ELETTRONICA HANDBOOKS

ANTENNE RICEVENTI E TRASMITTENTI

GRUPPO EDITORIALE JACKSON

ELETTRONICA HANDBOOKS

ANTENNE RICEVENTI E TRASMITTENTI

GRUPPO EDITORIALE JACKSON

Direttore responsabile :
Paolo Reina

Direttore di divisione :
Roberto Pancaldi

Supervisore dell'opera :
Fosco Bellomo

Coordinamento editoriale :
Renata Rossi

Copertina :
Sergio Mazzali

Fotolito :
3C - Milano

Stampa :
GRAFICA 85 - Rodano Millepini

Distribuzione :
Sodip - Milano

Tutti i diritti di riproduzione e pubblicazione di disegni , fotografie e testi sono riservati.

© Gruppo Editoriale Jackson - 1988

Aut. alla pubblicazione n^{0} 793 del 30/11/1987
(autorizzazione della Direzione Provinciale delle PPTT di Milano)

INDICE

Capitolo 1

5 Campi elettromagnetici

Capitolo 2

17 Caratteristiche elettriche delle antenne

Capitolo 3

35 Caratteristiche direzionali delle antenne

Capitolo 4

55 Dipoli e antenne a filo lungo

Capitolo 5

75 Antenne verticali e antenne con elementi parassiti

Capitolo 6

99 Antenne per alte e altissime frequenze

Capitolo 7

125 Linee di trasmissione

CAPITOLO 1

CAMPI ELETTROMAGNETICI

Tutti i processi che riguardano una emittente radio o qualsiasi altro dispositivo che utilizzi le onde hertziane per la trasmissione di informazioni, porta, inesorabilmente, all'elemento incaricato di irradiare o trasmettere l'informazione, cioè, l'*antenna*.

Per quel che riguarda il ricevitore il discorso è simile. L'informazione è raccolta o captata dall'antenna ricevente, e trasformata successivamente nella forma in cui era stata generata dall'emittente.

Cos'è che rende possibile ad un segnale di radiofrequenza, debitamente amplificato in frequenza, di spostarsi dall'antenna emittente a quella ricevente?

La risposta sta nell'essenza stessa dei fenomeni elettromagnetici, ragione per cui iniziamo questo testo con un'analisi della generazione e della propagazione dei campi elettromagnetici, entrambi aspetti di estrema importanza per la successiva comprensione del comportamento delle antenne riceventi e trasmittenti.

Campo elettrico

Senza pretendere di entrare in considerazioni eccessivamente teoriche, che esulano dalle finalità di questo capitolo, meramente divulgativo, basti sapere che un campo elettrico è una caratteristica propria di determinati punti dello spazio, rivelabile dal fatto che se si colloca al suo interno una carica elettrica, la stessa si trova sottoposta ad una forza di attrazione, o ad una di repulsione, dovuta a detto campo elettrico.

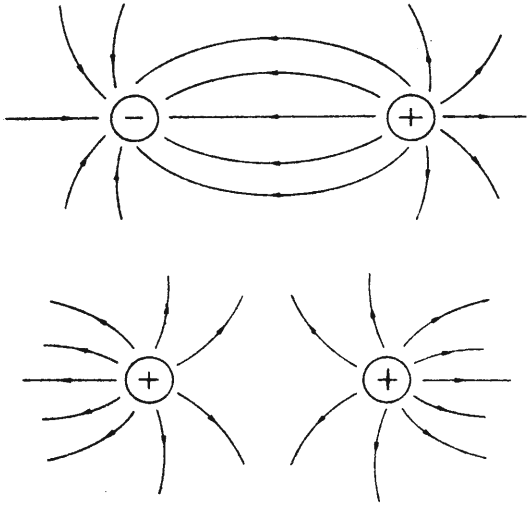


Fig. 1.- Parte superiore: campo elettrico generato da due cariche di segno diverso. Parte inferiore: campo elettrico generato da due cariche positive. Per convenzione, le linee di forza partono dalle cariche positive e arrivano a quelle negative.

Una carica dà luogo nel suo intorno a una zona di influenza, in modo tale che qualsiasi altra particella di carica a lei prossima sarà sottoposta all'azione di una forza.

La zona di spazio nella quale sono rilevabili questi effetti è la zona di influenza del campo citato, e tanto maggiore sarà la carica che crea il campo, tanto più lontano si estenderà la sua zona di influenza.

Gli effetti esercitati dai corpi elettrizzati (forze di attrazione e repulsione, influenza elettrostatica, ecc.) non si propagano solo nell'aria, ma anche in tutti i corpi isolanti e, persino, nel vuoto.

Abitualmente si ricorre a qualcosa di fittizio per esplicare gli effetti elettrostatici descritti: le *linee di forza*. Queste sono delle linee immaginarie ripartite in tutto il campo elettrico, che trasmettono le forze di repulsione e di attrazione, partendo dalle cariche positive verso quelle negative.

Si osservi che il campo elettrico è generato da una carica elettrica a riposo, il che significa che non è necessario nessun spostamento delle cariche per dare origine a questo.

Per concludere, il campo elettrico viene definito dalla misura di un parametro chiamato *intensità di campo*, che viene normalmente indicato con la lettera *E*, proporzionato in modo tale che, quanto maggiore risulta il campo, tanto più grande risulta E, e viceversa.

Campo magnetico

La maggioranza dei lettori comincia ora a prendere conoscenza delle caratteristiche di attrazione e di repulsione dei magneti naturali.

Molto bene: detti fenomeni, e altri meno visibili, sono dovuti alla presenza di una zona di influenza simile a quella del campo elettrico, generata dal magnete stesso, che prende il nome di *campo magnetico*.

Per analogia con il campo elettrico, il campo magnetico viene rappresentato tramite linee di forza immaginarie, distribuite in modo tale che siano entranti sul polo sud e uscenti sul polo nord del magnete; queste linee indicano la traiettoria che una particella magnetica segue se viene lasciata libera nella zona di influenza del campo magnetico descritto.

Una caratteristica importante dei campi magnetici consiste nel fatto che la loro intensità dipende dal mezzo in cui si sviluppano; lo stesso magnete esercita, per esempio, più influenza nel ferro che nell'aria. Questa differenza di comportamento è dovuta a un parametro definito *permeabilità*.

Il campo magnetico, inoltre, viene misurato per mezzo di un parametro che prende il nome di *intensità del campo magnetico*, indicato con la lettera *H*, e riferito sempre al vuoto come mezzo di influenza.

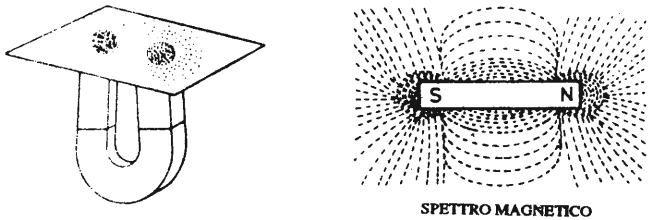


Fig. 2.- A sinistra, aspetto del campo generato da un magnete in ferro. A destra, spettro magnetico corrispondente alle linee di forza del campo magnetico generato da un magnete rettilineo.

Quando si tratta di un mezzo fisico concreto, l'intensità di campo risulta influenzata dal fattore di correzione dovuto alla permeabilità, e prende il nome di *induzione magnetica* β, per cui:

$$\beta = \mu \times H$$

Quello che molta gente ignora, è il fatto che un campo magnetico può

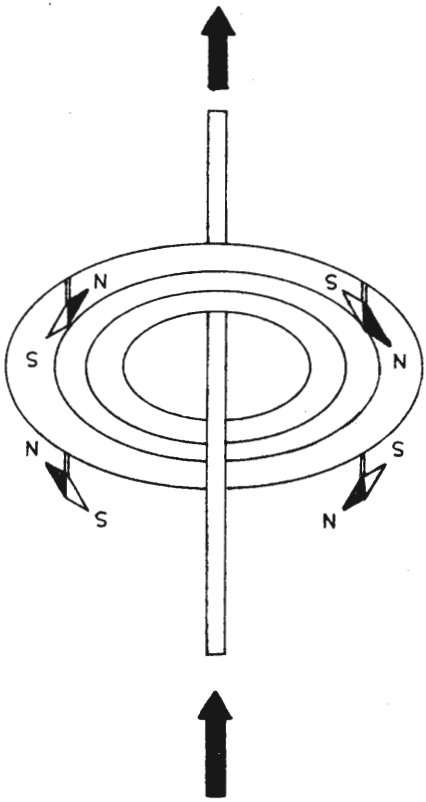


Fig. 3.- Le linee di forza generate da un conduttore rettilineo percorso da una corrente sono concentriche, e sono poste su un piano perpendicolare allo stesso.

anche essere generato da cariche elettriche in movimento, e quindi, dalla corrente elettrica; questo fatto può essere verificato con un semplice esperimento, che consiste nel collocare un ago magnetizzato nelle vicinanze di un conduttore nel quale circola corrente elettrica.

Si può osservare che l'ago si orienta in direzione della tangente alla circonferenza concentrica al conduttore, che passa per il punto di incontro con lo stesso ago, con il polo nord direzionato con il verso di rotazione di un cavatappi che si avvita nel senso di avanzamento della corrente elettrica del conduttore.

Questo significa che nelle vicinanze di un conduttore esiste un campo magnetico che farà *sentire* la propria influenza sul mezzo che lo circonda.

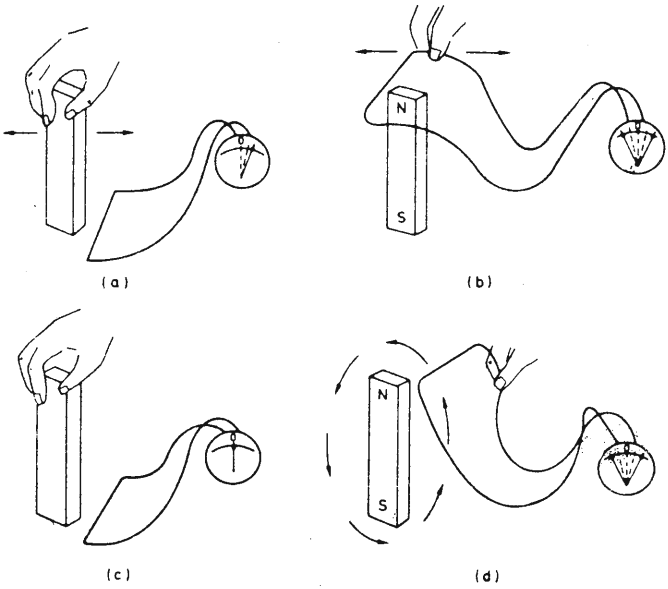


Fig. 4.- Disegno che presenta quattro diversi modi di generare una f.e.m. indotta: a) spostando un magnete da un lato all'altro di un conduttore. b) lasciando il magnete fermo e muovendo il conduttore. c) la f.e.m. indotta è nulla se sono fermi sia il magnete che il conduttore. d) lasciando il magnete fermo e facendogli ruotare il conduttore intorno.

Forza elettromotrice indotta

Il fenomeno che abbiamo descritto, è quello fondamentale dell'*elettromagnetismo* (generazioni di campi magnetici per mezzo di correnti elettriche), ed è reversibile; se in un conduttore elettrico si produce una variazione di campo magnetico, per le ragioni che sappiamo, si genera nello stesso una forza elettromotrice che prende il nome di *f.e.m. indotta*, la quale farà circolare una corrente elettrica a condizione che il il circuito risulti chiuso.

Entrambi i fenomeni, elettromagnetismo e induzione, sono i principi sui quali si basa il funzionamento delle antenne emittenti e riceventi, come si vedrà nei prossimi paragrafi.

Propagazione delle onde radio

Fisicamente, una antenna è costituita da uno o più conduttori con caratteristiche particolari, collocati a una certa altezza dal terreno, che trasmettono o captano energia elettromagnetica.

Se si applica ad una antenna una corrente alternata in radiofrequenza, le cariche elettriche produrranno nelle loro vicinanze dei campi elettrici, mentre le correnti elettriche che circolano in essa, essendo variabili (in quanto sono in

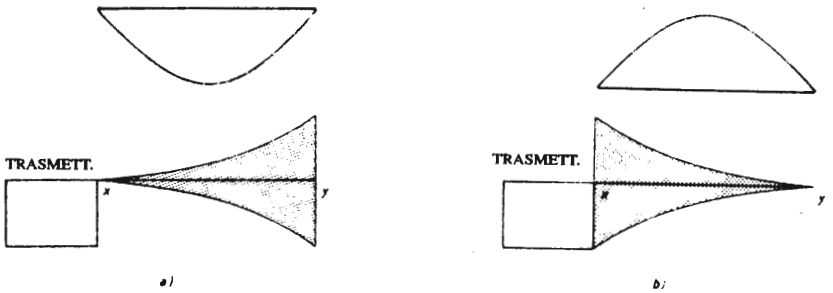


Fig. 5.- Situazione dei campi raggianti durante un'emissione radioelettrica: a) durante il primo semiciclo del segnale, la maggioranza degli elettroni del punto x si spostano verso il punto y; b) all'inizio del secondo semiciclo gli elettroni ritornano dal punto y verso il punto x.

radiofrequenza), generano campi magnetici ugualmente variabili.

Questi cambi periodici dell'intensità di campo provocano una alterazione delle caratteristiche elettromagnetiche del mezzo (l'aria, nel nostro caso), alterazioni che si propagano nello spazio alla velocità della luce (approssimativamente 300.000 Km/sec.), e che prendono il nome di *onde hertziane* o *onde elettromagnetiche*.

L'onda, anche definita di campo, si allontana dall'antenna trasportando due componenti fondamentali: il campo di induzione e il campo di irradiazione.

In seguito all'importanza del tema, analizziamo con maggior dettaglio come si produce la radiazione. Per fare questo, immaginiamo una stazione emittente la cui antenna abbia una lunghezza xy esattamente uguale a metà della lunghezza d'onda della frequenza dell'onda da trasmettere, e cioè, $xy = \lambda/2$.

Quando questo segnale viene applicato all'antenna, si produrrà la seguente sequenza di fatti:

- 1° Gli elettroni si disporranno dal punto x di un estremo dell'antenna verso il punto y, situato all'estremo opposto.
- 2° Durante il primo semiciclo del segnale, la maggioranza degli elettroni del punto x si sposteranno verso il punto y.
- 3° Il punto y citato, essendo aperto, forma una barriera per gli elettroni, i quali, di conseguenza, si bloccheranno completamente.
- 4° All'inizio del secondo semiciclo, gli elettroni cominceranno il ritorno dal punto y verso il punto x.
- 5° Durante la seconda metà del ciclo, tutti gli elettroni del punto y saranno attratti verso x.
- 6° All'inizio di un nuovo semiciclo del segnale applicato all'antenna, gli elettroni cominceranno nuovamente la loro traslazione dall'estremo del punto x verso il punto y, ripetendo la precedente sequenza.

Questa azione periodica avviene mentre l'emettitore fornisce energia in alta frequenza all'antenna, e viene ripetuto un numero di volte al secondo pari al valore della frequenza della corrente alternata applicata.

La conseguenza dello spostamento degli elettroni, descritto precedentemente, è la generazione di campi elettrici e magnetici attorno all'antenna cui appartengono, che, come abbiamo già indicato precedentemente, formano l'onda elettromagnetica che si diffonde nello spazio.

Il massimo flusso di elettroni si produce nel centro dell'antenna, corrispondente ad un quarto della lunghezza dell'onda, poiché la media dell'impedenza o opposizione minima al passaggio della corrente elettrica (non si scordi

che si tratta di una corrente alternata), si produce esattamente in questo punto.

Da questo si deduce che il maggior numero delle linee di forza del campo magnetico corrispondente, si localizza concentricamente attorno al centro dell'antenna, per cui detto punto può considerarsi, a tutti gli effetti, come una fonte di energia elettrica alternata.

Tra gli estremi dell'antenna esiste, d'altra parte, una certa capacità elettrica, e posto che il maggior numero di elettroni si accumuli, come abbiamo visto, negli estremi indicati (poiché è lì che esiste la massima opposizione al flusso, o circolazione degli elettroni), la massima intensità di campo elettrico si produrrà tra detti punti, come si può notare nella Fig. 6, nella quale viene rappresentato lo spettro delle linee di forza del campo magnetico risultante.

E' importante osservare che i valori massimi del campo elettrico e del campo magnetico generati dai segnali dell'antenna, non si presentano simultaneamente.

Questo perché, quando si chiude il primo semiciclo, tutto il flusso degli elettroni cessa, e diventerà nullo il campo magnetico corrispondente (poiché, come si è visto precedentemente, per l'esistenza di un campo magnetico è necessario che le cariche elettriche siano in movimento).

In questo istante, tuttavia, il campo elettrico è massimo, poiché tra i due estremi si è accumulata la massima quantità di elettroni e, di conseguenza, la massima carica elettrica (e pertanto, la massima intensità di campo elettrico).

Evidentemente, questo significa che i due campi si trovano sfasati di 90° elettrici o, detto in altro modo, il campo magnetico è massimo quando il segnale applicato all'antenna si trova ad un massimo (essendo nullo il campo elettrico), e il campo elettrico raggiunge il suo massimo valore quando il segnale dell'antenna è al minimo (essendo nullo il campo magnetico).

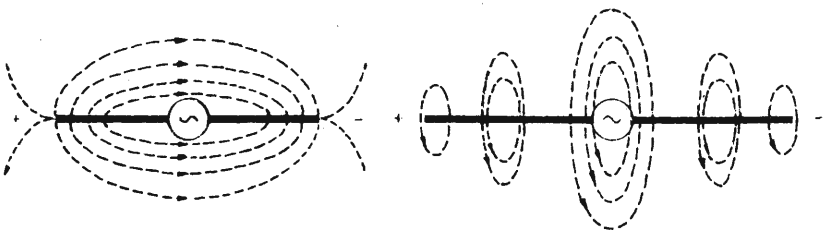


Fig. 6.- Distribuzione del campo magnetico (a sinistra), e del campo elettrico (a destra) in una antenna.

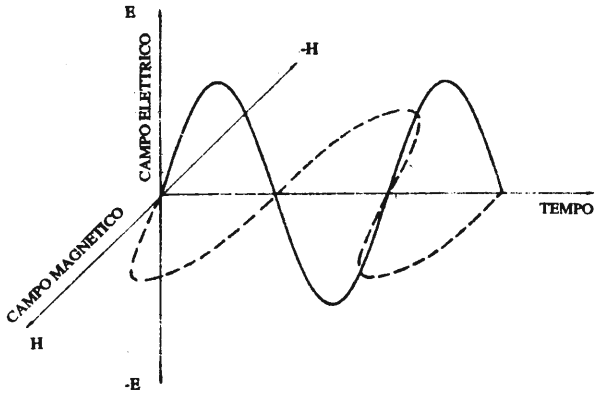


Fig. 7.- Campo di irradiazione in vista tridimensionale. I campi magnetico ed elettrico sono sfasati di 90° nello spazi,o e si incontrano in fase sull'asse dei tempi.

Quando inizia la circolazione degli elettroni dal punto y verso il punto x, il campo magnetico aumenta nel verso opposto a quello rappresentato nel caso precedente, mentre il campo elettrico diminuisce.

Se si confrontano le figure corrispondenti delle linee di forza dei campi elettrico e magnetico, si nota che dette linee sono tra di loro perpendicolari, il che presuppone una certa corroborazione dello sfasamento di 90° esistente tra i campi citati, solo che in questo caso lo sfasamento è spaziale.

Di tutto quanto esposto possiamo trarre una conclusione a titolo riassuntivo: i campi elettrico e magnetico generati dal segnale di antenna sono sfasati di 90° in direzione e tempo o, detto in altro modo, entrambi i campi si trovano in quadratura spazio-temporale.

Campi raggianti e induzione

Il calcolo dei campi elettromagnetici risultanti dalla corrente circolante nell'antenna, è una operazione estremamente complessa, che investe le matematiche avanzate. Noi, in questa opera, semplificheremo i risultati partendo dall'accettazione di alcuni presupposti. Per principio, accetteremo che i campi elettrico e magnetico siano posti ad angolo retto nello spazio.

Inoltre si può dimostrare matematicamente che il campo magnetico to-

tale è composto da due componenti in fase nel tempo.

Una di queste due componenti è inversamente proporzionale alla distanza dall'antenna, e l'altra è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dall'antenna. Quando queste due componenti vengono sommate vettorialmente, forniscono il campo magnetico totale effettivo.

Per quanto riguarda il campo elettrico effettivo totale, si può affermare che è composto da tre componenti: la prima è inversamente proporzionale alla distanza dall'antenna; la seconda è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dall'antenna; la terza è inversamente proporzionale al cubo della distanza.

Così come il campo magnetico totale è composto da due componenti in fase nel tempo, nel caso del campo elettrico tutte le componenti non sono in fase nel tempo.

La componente del campo elettrico che è inversamente proporzionale al cubo della distanza, ha una relazione di fase di 90° rispetto alle altre due.

Le caratteristiche e le relazioni tra i campi elettrico e magnetico quando si combinano, permettono la compressione dei due campi elettromagnetici, e cioè, quello della radiazione e quello dell'induzione.

Nel campo di radiazione, i campi elettrico e magnetico sono sfasati di 90° nello spazio e in fase nel tempo, come si può osservare nella figura, nella quale è stato rappresentato il campo elettrico E con una linea continua e il campo magnetico H con una linea tratteggiata.

Il campo di induzione contiene la componente elettrica che è proporzionale al cubo della distanza, per cui questo campo può apprezzarsi quando la distanza è maggiore di alcune lunghezze d'onda.

Tuttavia, quando si tratta dell'energia irradiata nelle vicinanze dell'an-

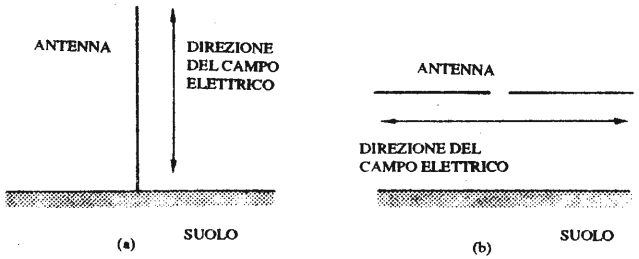


Fig. 8.- Diagramma di polarizzazione di una antenna: a) posizione verticale; b) posizione orizzontale.

tenna, devono essere tenuti in considerazione gli effetti del campo di induzione.

Nel campo raggiante, che è quello che più ci interessa, abbiamo detto che i campi elettrico e magnetico sono in fase nel tempo, per cui si dissipa potenza. Questa potenza viene irradiata fuori dall'antenna.

Polarizzazione di un' antenna

Il termine *polarizzazione*, legato alle antenne, si riferisce alla direzione dei campi magnetico ed elettrico di detta antenna.

La polarizzazione di una antenna è determinata dalla direzione del piano dell'onda elettrica. In questo modo, una antenna orizzontale, rispetto alla superficie terrestre, produce un piano d'onda come quello mostrato in figura.

In detta figura si può notare che il campo elettrico E è orizzontale, e pertanto si dice che questa antenna è polarizzata orizzontalmente.

Se l'antenna è perpendicolare alla superficie terrestre, produrrà il piano delle onde mostrato nella figura, nella quale il campo elettrico E è verticale.

Si dice pertanto che l'antenna è polarizzata verticalmente.

In entrambe le polarizzazioni, salvo l'inversione di fase di 180° durante il ciclo, la direzione del campo elettrico non varia, e cioè, *un' onda polarizzata orizzontalmente rimane sempre orizzontale, e un' onda polarizzata verticalmente rimane sempre verticale.*

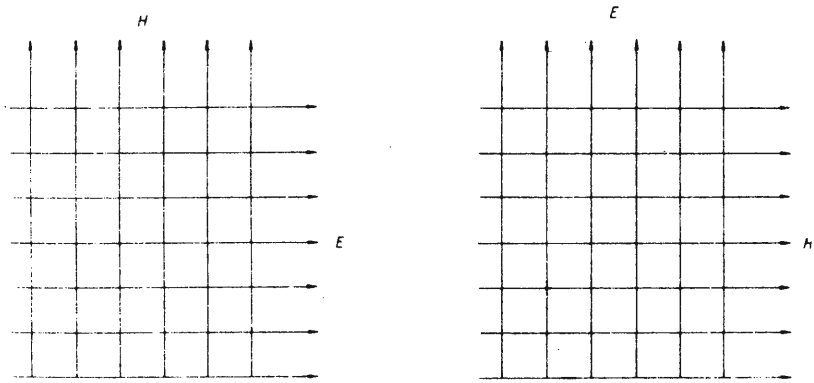


Fig. 9.- Campi magnetici, H, ed elettrico, E, su un fronte d'onda di polarizzazione orizzontale (a sinistra), e di polarizzazione verticale (a destra).

La scelta di un'altra forma di polarizzazione dipende dalla frequenza di emissione, e dagli effetti risultanti dai tipi di propagazione terrestre e ionosferica. Nel caso, poco frequente in pratica, in cui l'antenna risulta inclinata, il campo elettrico avrà due componenti: una orizzontale e l'altra verticale, in modo che la loro risultante sia sempre parallela all'antenna.

Esistono antenne che irradiano con altri tipi di polarizzazione. Le più conosciute sono quella ellittica e quella circolare, che, inoltre, possono essere a destra o a sinistra, in funzione del verso di rotazione del campo elettrico.

Nei capitoli successivi torneremo ad affrontare questo interessante tema della polarizzazione di una antenna.

CAPITOLO 2

CARATTERISTICHE ELETTRICHE DELLE ANTENNE

Anche senza entrare appieno nel problema, nel capitolo precedente si è trattato il principio della generazione e dell'irradiazione delle onde elettromagnetiche per il segnale di antenna, come primo passo per arrivare a comprendere i fenomeni che avvengono in questo importante dispositivo.

In questo capitolo analizzeremo un po' più approfonditamente lo studio delle principali caratteristiche elettriche delle antenne emittenti e riceventi, che ci permetterà di arrivare, nei capitoli successivi, alla descrizione delle diverse classi di antenne, e delle loro prestazioni.

Il circuito oscillante aperto

Al fine di comprendere chiaramente il funzionamento di una antenna, si supponga un circuito oscillante, la cui frequenza di risonanza, come sappiamo, viene data dall'espressione:

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$

Se sul citato circuito si separano le armature del condensatore e si allungano le spire della sua bobina, la sua capacità e la sua induttanza diminuiranno, con conseguente aumento della frequenza di risonanza del circuito.

Se si suppone di continuare in questo modo, si otterrà un conduttore diritto che, anche se avrà poche somiglianze con un circuito oscillante, ha le stes-

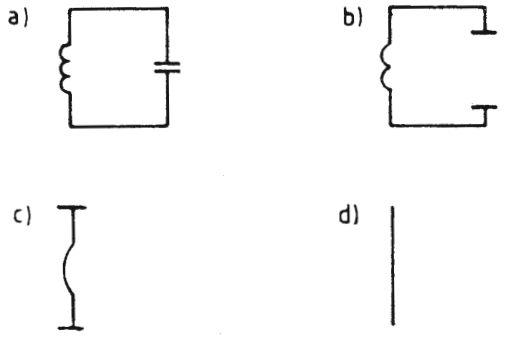


Fig. 1.- Se si separano le armature dei condensatori (b), e si allungano le spire della bobina (c) di un circuito oscillante (a), si arriva ad avere un pezzo di conduttore rettilineo (d) che ha le stesse proprietà di un circuito oscillante, e che viene chiamato dipolo.

se proprietà di questo. Da quanto abbiamo terminato di esporre (vedasi la formula della frequenza di risonanza), è evidente che in questo ultimo caso la frequenza di risonanza risulterà notevolmente aumentata.

La capacità e l'induttanza sono, naturalmente, presenti, ma ripartite lungo il conduttore, per cui la frequenza di risonanza di tale circuito oscillante dipende, in pratica, solamente dalla sua lunghezza.

Un circuito oscillante formato da un pezzo di conduttore rettilineo viene chiamato *dipolo*, la cui lunghezza, come vedremo più avanti, è strettamente legata, per le ragioni esposte, alla frequenza del segnale di antenna, sia nella fase di emissione che in quella di ricezione.

Da quanto trattato nel capitolo precedente, sappiamo che in un conduttore con queste caratteristiche, gli elettroni si muovono continuamente da un lato all'altro del dipolo, con la massima intensità nel punto medio, che diminuisce man mano che ci si avvicina agli estremi.

Viceversa, la tensione raggiunge il suo massimo valore agli estremi, e diminuisce man mano che ci si avvicina al centro, sempre che si tratti, come è logico, di un dipolo di media lunghezza d'onda.

Per far sì che un'antenna fornisca un buon rendimento, deve risuonare alla frequenza di lavoro, e deve essere eliminata la componente reattiva. Quando si raggiunge questa condizione, a parità di potenza fornita a un'antenna, circolerà una maggiore intensità di corrente.

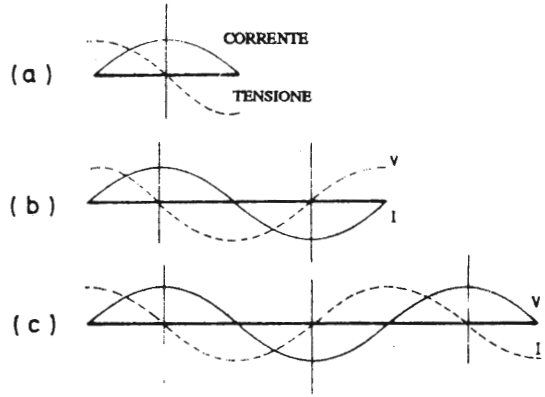


Fig. 2.- Grafici di tensione e intensità di risonanza in una antenna orizzontale: a) di mezza onda; b) di onda completa; c) di 3/2 della lunghezza d'onda.

La risonanza di una antenna, si ottiene se lungo questa si realizzano delle curvature e dei nodi di intensità, in funzione del numero delle semionde che può portare.

Nel caso di una antenna isolata da terra, la misura della risonanza sarà uguale a mezza lunghezza dell'onda e ai suoi multipli accoppiati, poiché agli estremi dell'antenna possono esistere solo nodi di intensità (posto che in questi non ci sia circolazione di elettroni).

Trattandosi di una antenna verticale connessa a terra ad un estremo, la minima lunghezza per la quale si ottiene la risonanza è un quarto di onda, perché la distribuzione delle onde stazionarie in questo tipo di antenna non permette più di un nodo di tensione all'altezza della presa di terra, e un nodo di corrente al suo estremo, come viene mostrato nella figura corrispondente.

Pertanto, una antenna verticale con presa di terra, entrerà in risonanza quando raggiunge una lunghezza di un quarto di onda o un multiplo dispari di questa.

La lunghezza elettrica di un'onda in radiofrequenza, è in relazione con la velocità di propagazione nello spazio, e con la sua frequenza, tramite l'equazione:

$$L = \lambda = V \times T = V / f = 300.000 / f$$

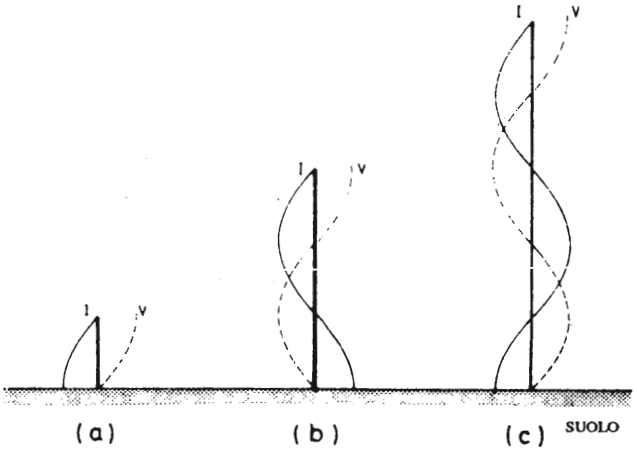


Fig. 3.- Grafici di tensione e di intensità di risonanza in diverse antenne verticali: a) di un quarto di onda. b) di 3/4 della lunghezza d'onda. c) di un'onda e un quarto.

in cui L viene espressa in metri, e f in KHz. Tuttavia, come vedremo successivamente, la lunghezza fisica di una antenna risulterà sempre minore della sua lunghezza elettrica (o lunghezza dell'onda del segnale di antenna), per via degli oggetti interposti, della relazione lunghezza/diametro, e dell'effetto degli isolatori sui terminali dell'antenna.

Impedenza di una antenna

Dato che nel dipolo esiste una risonanza, come abbiamo appena visto nel paragrafo precedente (posto che si tratti di un circuito oscillante), questi presenterà una impedenza specifica in ciascun punto della sua lunghezza; ciò può essere facilmente verificato, confrontando i valori di tensione e di corrente distribuiti lungo i dipoli di Fig. 2, nella quale si analizza la risonanza di un'antenna orizzontale.

Supposto che l'impedenza di qualsiasi circuito elettrico è uguale al rapporto tra la tensione applicata e l'intensità che lo percorre, si può costruire una curva di impedenza, nella quale si può osservare che il valore più elevato si presenta nei punti ove la corrente è minima, quindi sugli estremi, e viceversa.

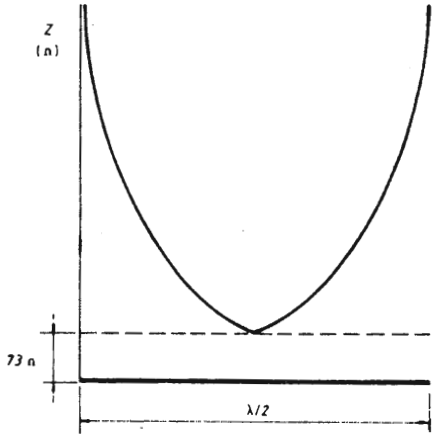


Fig. 4.- Curva dell'impedenza di una antenna a dipolo di mezza lunghezza d'onda.

La distribuzione della tensione e della corrente lungo un'antenna posta nello spazio libero (situazione teorica), dipende dal fatto che questa sia o meno risonante alla frequenza dell'energia ricevuta. Dal momento che risulta pra-

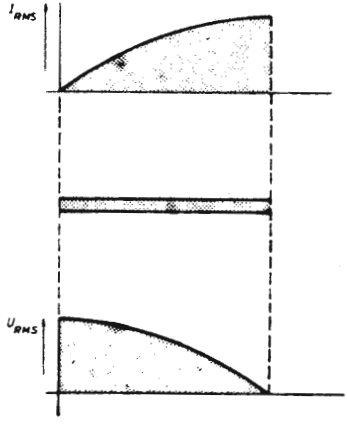


Fig. 5.- Distribuzione della corrente (parte superiore), e della tensione (parte inferiore) efficaci nelle vicinanze di un dipolo di un quarto di lunghezza d'onda (parte centrale).

ticamente impossibile isolare completamente l'antenna da terra, per via degli oggetti che si trovano nelle vicinanze, ecc. , la distribuzione della tensione e della corrente varia per gli effetti induttivi e capacitivi indotti.

Questo, a sua volta, porta a una variazione dei valori di impedenza lungo la lunghezza dell'antenna.

Il valore dell'impedenza misurata nel centro di un dipolo, la cui lunghezza fisica risulti 1/2 della lunghezza d'onda della frequenza di risonanza, è di 73 Ω, mentre ai suoi estremi raggiunge valori prossimi ai 2400 Ω.

Nel caso di antenne la cui lunghezza risulta essere di 1/4 della lunghezza d'onda ricevuta, l'impedenza sull'estremo dove è presente la massima corrente è di circa 36 Ω, mentre sull'estremo opposto (quello di massima tensione e minima corrente), raggiunge valori di circa 4800 Ω.

Tra i punti possibili di prelievo di segnale in una antenna, si opterà per quello la cui impedenza risulta uguale a quella dell'ingresso di antenna del ricevitore, con l'obiettivo di ottenere il massimo trasferimento di energia dall'antenna al ricevitore.

Quando l'antenna viene alimentata al massimo dell'intensità, l'impedenza è bassa, e allora si dice che è alimentata in corrente. Tuttavia, vi sono casi in cui l'antenna viene alimentata in un punto di corrente minima, vale a dire in un punto di massima tensione; in questo caso si dirà quindi che l'antenna è alimentata in tensione.

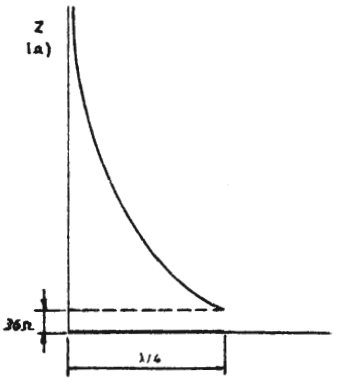


Fig. 6.- Curva dell' impedenza di una antenna a dipolo di un quarto di lunghezza d' onda.

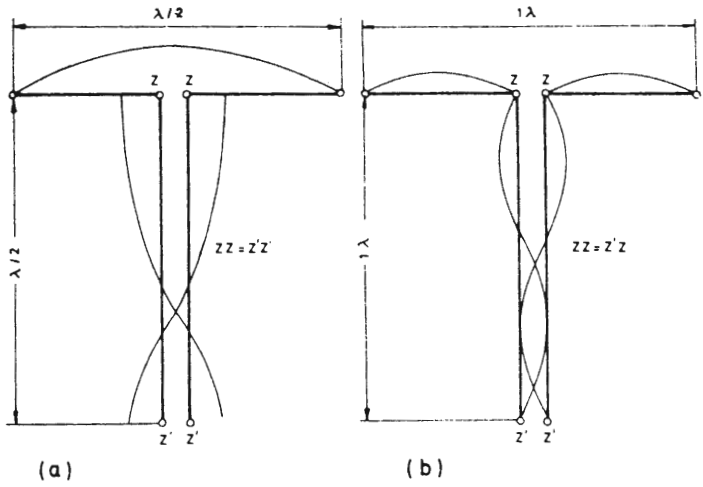


Fig. 7.- Diagramma della distribuzione di corrente in una antenna orizzontale : a) di mezza onda. b) di un'onda completa. In entrambi i casi sono anche rappresentate le correnti nelle linee di discesa d'antenna.

Per concludere questo paragrafo, segnaliamo che la relazione lunghezza/diametro di una antenna, è a sua volta funzione dell'impedenza stessa dell'antenna, e all'aumentare di questa relazione corrisponde un leggero aumento del valore dell'impedenza, aumento che porta alla saturazione, per valori elevati della citata relazione L/D.

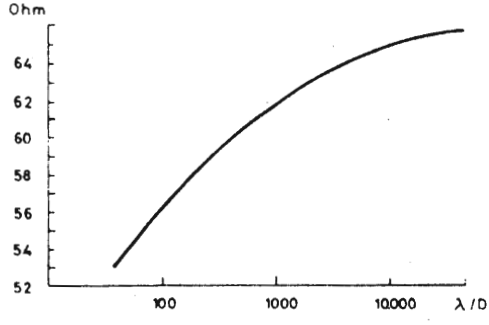


Fig. 8.- Grafico di variazione dell'impedenza di un'antenna in funzione del rapporto lunghezza d'onda/diametro del conduttore.

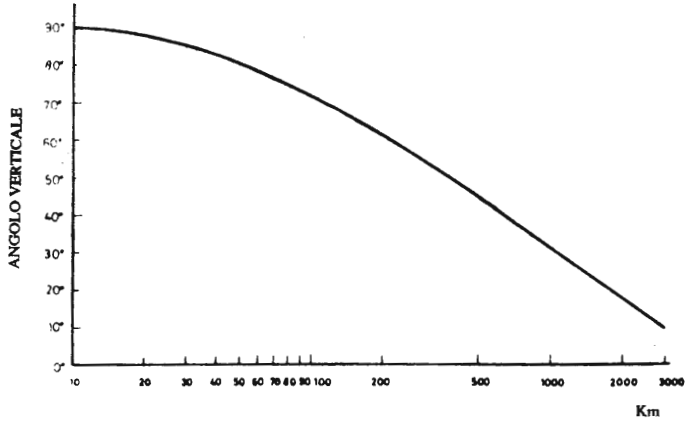


Fig. 9.- Distanza che si può ottenere con un salto, in funzione dell'angolo verticale di irradiazione.

Larghezza di banda

La banda di frequenze nella quale può funzionare una antenna, senza oltrepassare il limite prefissato delle onde stazionarie, viene abitualmente definita *larghezza di banda.*

L'impedenza del punto di alimentazione di una antenna, costruita con elementi di ampie dimensioni, varia in misura inferiore, rispetto ad una costruita con elementi di dimensioni ridotte, il che indica che una antenna con un Q basso permette una maggiore larghezza di banda, rispetto a una che presenta un Q alto, e potrà essere utilizzata in un margine di frequenza molto ristretto.

Potremmo dare anche altre definizioni della larghezza di banda di una antenna, facendo riferimento a fattori come il *guadagno*, l'*impedenza*, ecc. , però queste caratteristiche sono legate al margine di frequenza di funzionamento.

Il guadagno e l'impedenza limitano normalmente il margine di funzionamento nella regione HF delle frequenze, mentre il cambio delle caratteristiche suddette limita il margine di quelle VHF.

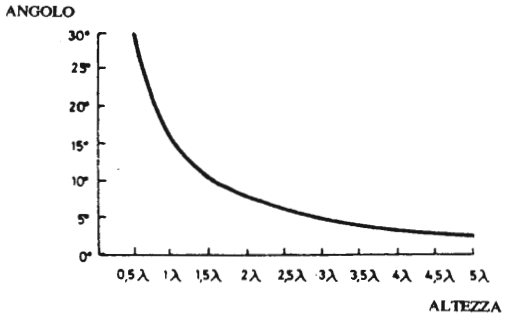


FIg. 10.- Angolo verticale di irradiazione in funzione dell'altezza dell'antenna dal terreno.

Angolo di irradiazione

Viene definito *angolo di irradiazione* di una antenna, l'angolo che viene formato dall'asse del suo lobo di irradiazione principale rispetto all'orizzonte. Questo angolo si misura nel piano verticale, e viene determinato dal diagramma di irradiazione dell'antenna, dall'altezza della stessa rispetto al suolo, e dalla natura dello stesso.

Quando si affronterà lo studio dei diversi tipi di antenne emittenti e riceventi, si vedrà dettagliatamente in cosa consiste quello che viene definito lobo di irradiazione, concetto strettamente legato a quello dei campi di irradiazione e induzione, che sono stati analizzati nel capitolo precedente.

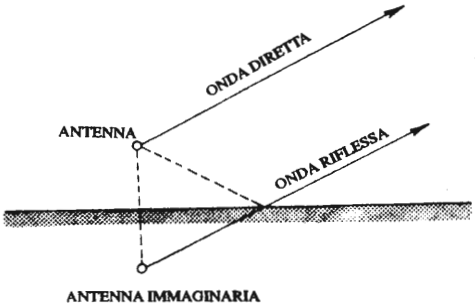


Fig. 11.- Influenza del terreno sull'antenna.

L'angolo di irradiazione ha una grande importanza, per poter raggiungere maggiori distanze *di salto* in un circuito. Se si tratta di antenne HF poste vicine al suolo, in relazione con la lunghezza d'onda, il suolo agirà sull'angolo di irradiazione, poiché parte dell'energia irradiata dall'antenna viene riflessa dal suolo e reinviata nello spazio.

Se il suolo è un buon conduttore, si forma una antenna immaginaria, e da questa parte un'altra onda; il campo irradiato risultante sarà la somma della componente dell'onda irradiata dall'antenna propriamente detta, e della componente dell'onda irradiata dall'antenna immaginaria.

Poiché l'onda riflessa ha percorso uno spazio maggiore di quella diretta, può verificarsi il caso che l'onda diretta e quella riflessa arrivino in un determinato punto in fase e si sommino, o che invece arrivino sfasate e che quindi si sottraggano, venendo così a ridursi, in questo caso, l'intensità di campo.

L'effetto descritto risulta differente in funzione del tipo di polarizzazione dell'antenna, poiché nell'antenna immaginaria si produce una inversione di segno nelle cariche elettriche e, come conseguenza, le onde polarizzate orizzontalmente subiscono uno sfasamento di 180°, mentre quelle polarizzate verticalmente non subiscono alcuna alterazione.

Intensità di campo di un dipolo

All'inizio di questo capitolo abbiamo visto come in un circuito oscillante aperto circoli una corrente alternata, e come tra i due estremi del dipolo si formi una tensione alternata. Inoltre, sappiamo che la corrente del dipolo genera un campo magnetico H, le cui linee di forza sono concentriche al dipolo

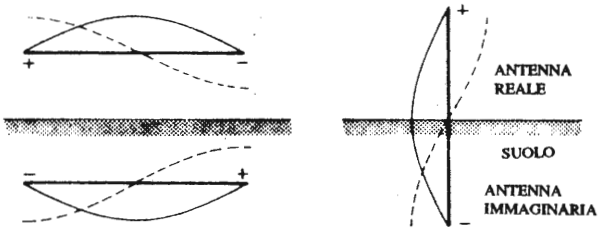


Fig. 12.- Grafici relativi alla formazione dell'antenna immaginaria, nel caso di antenna orizzontale (a sinistra), e di antenna verticale (a destra).

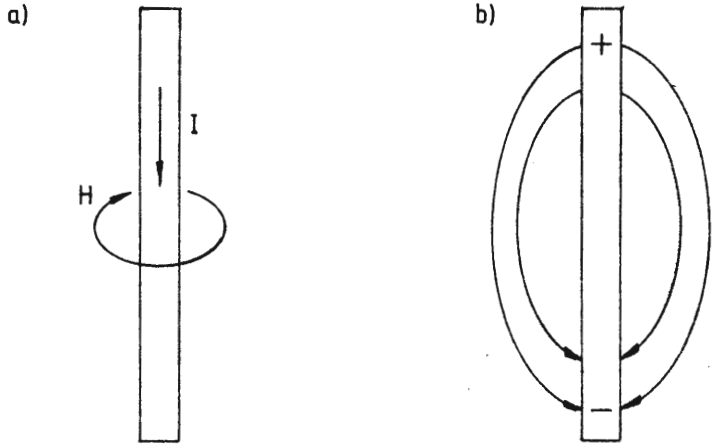


Fig. 13.- a) Campo magnetico anellare H provocato in un dipolo dal passaggio della corrente. b) Campo elettrico E generato in un dipolo dalla tensione.

(campo anellare), e che la tensione elettrica provocata dall'accumularsi degli elettroni origina un campo elettrico E, che ha la forma di un fuso.

Vediamo allora quali sono le differenze tra un dipolo o circuito oscillante aperto, e un circuito oscillante chiuso: nel circuito oscillante chiuso, si formano dei campi magnetici ed elettrici che forniscono l'energia al circuito, in modo che, in condizioni ideali, non si ha nessuna perdita di energia.

Tuttavia, nel circuito oscillante aperto, non esistono le armature del condensatore (per cui non potrebbe concentrarsi il campo elettrico), e nemmeno le bobine, poiché, come il lettore sa, sono legate al campo magnetico.

Le linee di forza si estendono, principalmente, esternamente al circuito oscillante, allontanandosi dal dipolo, per cui non c'è tempo per fornire energia al circuito oscillante nel momento in cui la corrente lo attraversa, o in cui la tensione risulta nulla.

Viceversa, queste linee di forza sono spinte verso l'esterno dal nuovo campo, che nel frattempo ha cambiato di polarità.

Poiché questi campi che si allontanano contengono energia, è evidente che il circuito oscillante la sta cedendo continuativamente. Questo è il motivo per cui deve ricevere, ininterrottamente, energia da un circuito oscillante chiuso.

Nelle figure si può osservare in modo grafico la formazione del campo

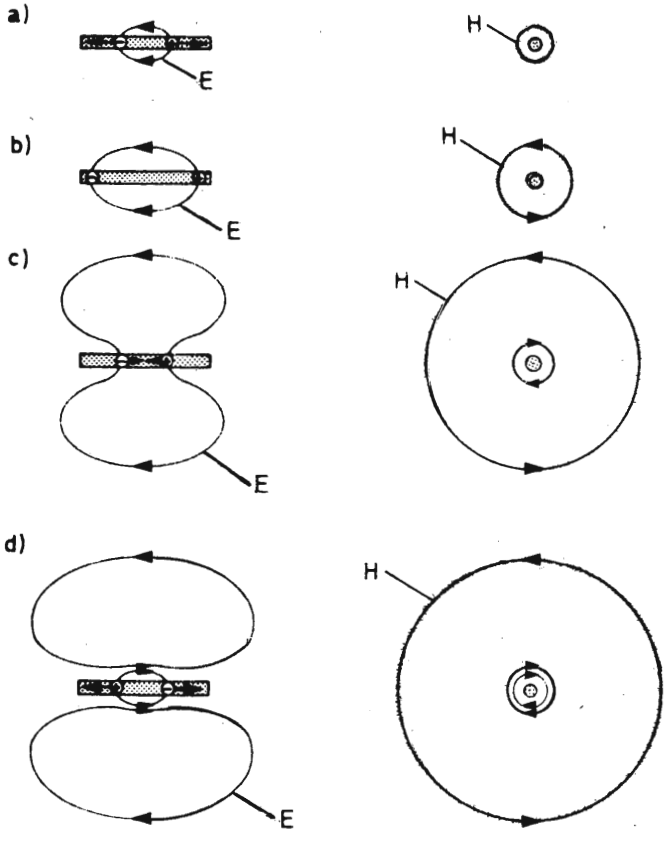


Fig. 14.- Generazione del campo elettrico E e del campo magnetico H durante una semioscillazione: a) inizio del procedimento; b) punto massimo del semiciclo; c) tratto discendente del semiciclo. Nel momento in cui le cariche si equilibrano, le linee di forza risultano strozzate, uscendo dal dipolo in forma simile all'effetto delle bolle di sapone che vengono espulse dalla cannuccia; d) nella successiva separazione delle cariche appaiono di nuovo una serie di linee di forza di verso opposto al precedente.

elettrico E, e del campo magnetico H, durante una semioscillazione. Le linee di forza corrispondenti al campo elettrico hanno origine, come già sappiamo, dalle cariche positive, e si chiudono con quelle negative, mentre quelle appar-

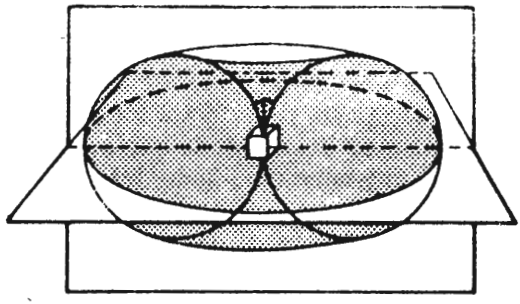


Fig. 15.- Caratteristiche di irradiazione verticali e orizzontali di una antenna a dipolo verticale.

tenenti al campo magnetico circondano l'asse del dipolo.

Nel momento in cui le cariche raggiungono l'equilibrio, le linee di forza risultano come strozzate, disperdendosi dal dipolo in modo simile a come si disperdono le bolle di sapone da una cannuccia.

Nella successiva separazione delle cariche, compaiono di nuovo una serie di linee di forza intorno al dipolo, ma questa volta con verso opposto al precedente.

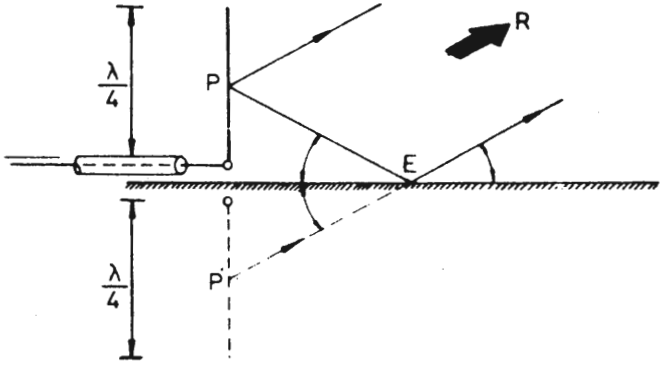


Fig. 16.- Il raggio del punto P viene riflesso nel punto E della superficie conduttrice, per cui questa svolge le funzioni dell'altra metà del dipolo.

L'intensità di campo (e con questa l'energia irradiata) diminuisce man mano che ci si allontana dal dipolo emittente. Questo è facilmente comprensibile, poiché l'energia va diminuendo man mano che l'onda si propaga sempre più nello spazio.

L'unità di misura dell'intensità del campo elettrico è il V/m, per cui a una distanza di 20 Km dal dipolo il valore efficace dell'intensità risulta essere, per esempio, E = 100 mV/m; a 80 Km di distanza risulterà di 25 mV/m, e cioè la quarta parte, e a 100 Km l'intensità del campo sarà sarà solamente di 20 mV/m (la quinta parte).

Misurando l'intensità di campo elettrico in prossimità di una antenna a dipolo verticale, si osserva che tutti quei punti dello spazio che hanno la stessa intensità di campo elettrico sono equidistanti dall'antenna.

Collegando tutti i punti equipotenziali si ottiene, quindi, un cerchio, il cui centro è costituito dall'antenna emittente. Una curva di questo tipo prende il nome di caratteristica irradiante o *lobo di irradiazione*.

Una antenna, tuttavia, irradia in tutte le direzioni.

Un piano orizzontale che taglia questa figura per il suo centro, origina una linea definita *caratteristica radiante orizzontale*, che forma, come si è detto, un cerchio il cui centro è rappresentato dall'antenna.

Un piano verticale che taglia la figura per il suo centro, origina una linea definita *caratteristica radiante verticale*, e ha la forma di un 8.

Tutti i punti situati sulla verticale dell'antenna hanno una intensità di

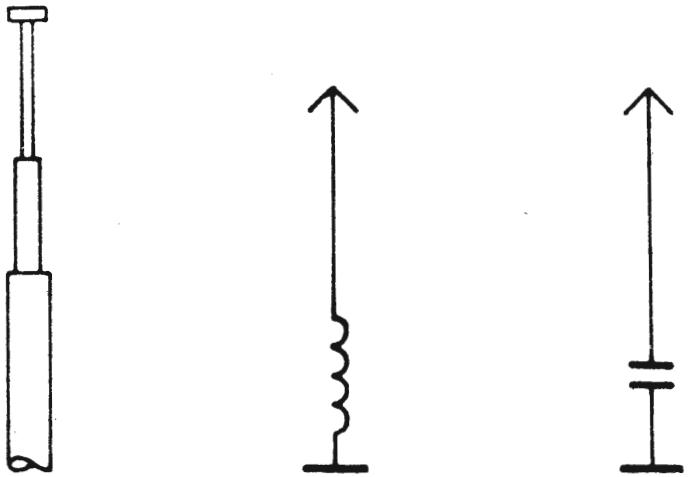


Fig. 17.- Antenna telescopica (a sinistra). Una bobina in serie con l'antenna (al centro) aumenta la lunghezza di quella precedente. Un condensatore in serie (a destra) invece, ne diminuisce la lunghezza.

campo elettrico zero, per cui tutti i ricevitori che si troveranno su questa verticale non riceveranno alcun segnale.

Dal dipolo verticale si ottiene l'antenna a stilo, che è costituita per la metà superiore da una antenna dipolo, con una lunghezza pari alla quarta parte della lunghezza d'onda che si desidera ricevere.

Posizionando una antenna a stilo su di una superficie conduttrice, si realizza uno specchio per le onde radioelettriche.

L'onda riflessa sostituisce in un certo qual modo quella prodotta dall'altra metà del dipolo.

Nella Fig. 16 è riportato un raggio derivante dal punto P, che si dirige verso un punto R distante di ricezione. Un secondo raggio, derivante dallo stesso punto P, viene riflesso in E e si dirige anch'esso verso R.

Per l'apparecchio ricevitore tutto sembra come se questo secondo raggio derivi realmente dal punto P', che è l'immagine riflessa di P.

Le antenne a stilo vengono utilizzate, per esempio, nelle automobili, e il tetto del veicolo agisce come superficie riflettente. Più avanti verrà approfondito meglio questo tema.

Così come negli apparecchi emittenti, la lunghezza dell'antenna a stilo è pari a un quarto della lunghezza d'onda della frequenza trasmessa, e questa lunghezza è invariabile, posto che l'emittente trasmetta a una frequenza unica determinata; nei ricevitori invece la cosa si complica, poiché questi sono normalmente progettati per ricevere segnali provenienti da diverse emittenti, e cioè, devono ricevere segnali con diverse lunghezze d'onda.

Per risolvere questo problema, si ricorre a delle antenne a stilo formate da vari elementi, inseriti uno dentro l'altro in modo telescopico, che formano le antenne comunemente chiamate *antenne telescopiche*.

Con questo metodo è possibile regolare la lunghezza dell'antenna esattamente sulla lunghezza d'onda che si desidera ricevere.

Un altro sistema per regolare la lunghezza dell'antenna sulla lunghezza d'onda dell'emittente, consiste nel connettere in serie all'antenna una bobina, con la quale la si allunga; connettendo un condensatore in serie con l'antenna, se ne accorcia invece la lunghezza.

Altezza efficace di una antenna

Consideriamo una antenna verticale la cui altezza geometrica H è pari a 1/4 della lunghezza d'onda che deve ricevere. La corrente di antenna I_a (valore efficace) raggiunge il suo valore massimo al piede dell'antenna, e diminuisce progressivamente verso la sua punta o estremo libero.

L'altezza efficace dell'antenna viene data dall'altezza del rettangolo

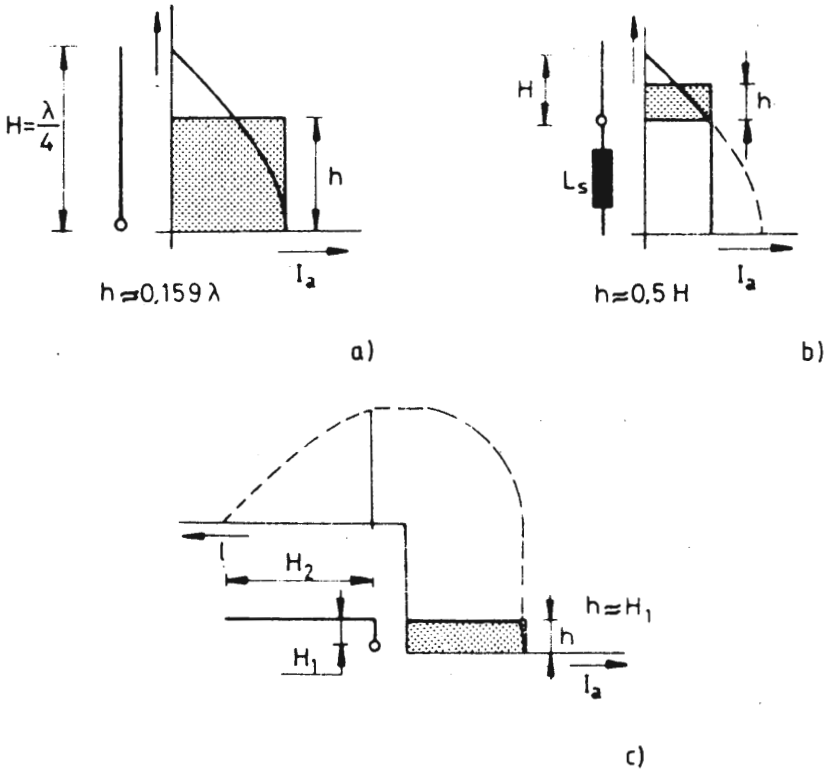


Fig. 18.- a) Curva della distribuzione della corrente in una antenna verticale di altezza H pari a 1/4 della lunghezza d'onda. b) Curva di distribuzione della corrente in una antenna di altezza H = λ /4 con una bobina allungatrice L_S in serie. c) Curva di distribuzione della corrente in una antenna a L.

(tracciato in figura) con base e superficie uguali alla curva di intensità.

Tra l'altezza geometrica H, e quella efficace h di una antenna λ/4 esiste, inoltre, la relazione:

$$h = \frac{2}{\pi} \times H = \frac{2}{\pi} \times \frac{\lambda}{4} \approx 0,159\,\lambda$$

Consideriamo adesso una antenna a stilo corta, formata nella parte supe-

riore da una antenna $\lambda/4$ e da una bobina allungatrice L_s. La curva di distribuzione della corrente in questa antenna è quella visibile in Fig. 18b. La corrente nella bobina è costante, mentre quella nell'antenna va progressivamente diminuendo.

Convertendo nuovamente la superficie ottenuta nel rettangolo tracciato, si ottiene l'altezza efficace h di questa antenna, che risulta essere quasi uguale alla metà dell'altezza geometrica H, e cioè:

$$h \approx 0,5\ H$$

Consideriamo, infine, una antenna a L, molto utilizzata nei primi tempi della radio. Questa antenna consta di una parte verticale, H_1, e di una parte orizzontale H_2. In questa antenna dobbiamo immaginarci la parte orizzontale H_2 come la punta di una antenna $\lambda/4$ piegata a 90°.

Se si è in presenza di un'onda che si propaga orizzontalmente, questa parte non partecipa alla ricezione del segnale, e viene utilizzata solo per la ricezione di onde che si propagano verticalmente.

L'altezza efficace h dell'antenna è, in questo caso, quasi uguale all'altezza geometrica H_1, per cui possiamo scrivere che:

$$h \approx H_1$$

Esiste una equazione sufficientemente semplice per calcolare l'altezza

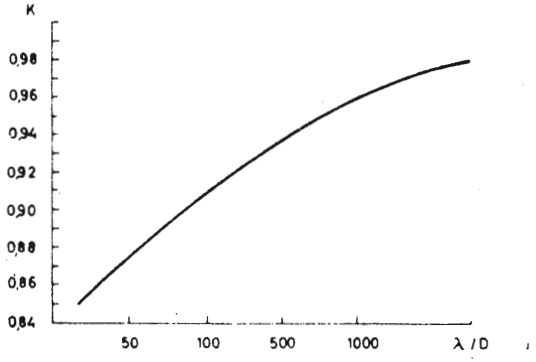


Fig. 19.- Grafico del fattore K di accorciamento, in funzione del rapporto lunghezza d'onda/diametro del conduttore.

efficace h di un'antenna:

$$h = \frac{143 \times K}{f}$$

nella quale f corrisponde al valore della frequenza del segnale (in MHz) e K è un fattore di correzione che dipende dal rapporto λ/D (lunghezza d'onda/diametro del conduttore), i cui valori sono definiti dal grafico di figura.

CAPITOLO 3

CARATTERISTICHE DIREZIONALI DELLE ANTENNE

Abbiamo terminato di analizzare le caratteristiche più importanti relative ai fenomeni elettromagnetici che riguardano le antenne, che ci hanno permesso di prendere contatto con aspetti molto legati al funzionamento delle stesse. Nel presente capitolo, e seguendo un piano di esposizione che consideriamo logico, cercheremo di iniziare il lettore sulle questioni essenziali, che sono comuni alle caratteristiche direzionali di tutte le classi di antenne, vale a dire aspetti come la direttività, l'isotropia, la polarizzazione, ecc., che sono supporti fondamentali per l'analisi dei differenti tipi di antenna, argomento che sarà sviluppato nei capitoli successivi.

Direttività

Attorno ad una antenna si può misurare l'intensità di campo prodotta dall'onda elettromagnetica irradiata dalla stessa. Se uniamo tutti i punti di uguale intensità, otterremo una curva che corrisponde al lobo di irradiazione dell'antenna, in modo tale che se le misure sono state effettuate sul piano orizzontale, la curva ottenuta fornisce il lobo di irradiazione orizzontale, mentre se queste sono state effettuate sul piano verticale si ottiene il lobo di irradiazione verticale, come è stato commentato nel capitolo precedente.

Le antenne si possono classificare in funzione della loro *direttività* sul piano orizzontale. Se il lobo di irradiazione è simile a una circonferenza con nel centro l'antenna, è *omnidirezionale*.

Se le radiazioni sono in due direzioni opposte, l'antenna è *bidirezionale*, e quando il lobo di irradiazione è in una sola direzione, l'antenna si dice *di-*

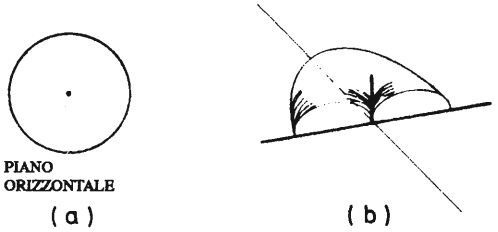


Fig. 1.- Antenna omnidirezionale: a) diagramma di irradiazione nel piano orizzontale; b) lobo di irradiazione visto in prospettiva.

rezionale. Le antenne direzionali, oltre al lobo principale, ne hanno altri più piccoli in altre direzioni; la differenza tra il lobo di irradiazione principale e quello di direzione opposta, ci fornisce il rapporto anteriore-posteriore, o *efficacia direttiva* dell'antenna.

Radiatore isotropico

Si chiama *radiatore isotropico*, una antenna immaginaria che irradia la stessa energia esattamente in tutte le direzioni: questa antenna sta nel centro di una sfera, nella quale tutti i punti della sua superficie ricevono la stessa quantità di energia.

Il radiatore isotropico esiste solo in teoria; un punto situato al centro di una sfera non può essere una antenna, poiché questa esige delle dimensioni fisiche in accordo con la frequenza di lavoro e, pertanto, si avrà una maggior ir-

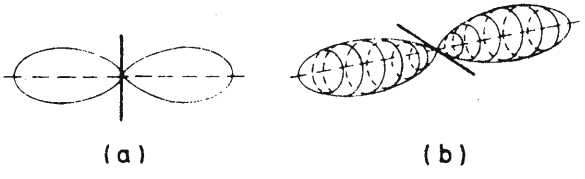


Fig. 2.- Antenna bidirezionale: a) diagramma di irradiazione nel piano orizzontale; b) lobo di irradiazione visto in prospettiva.

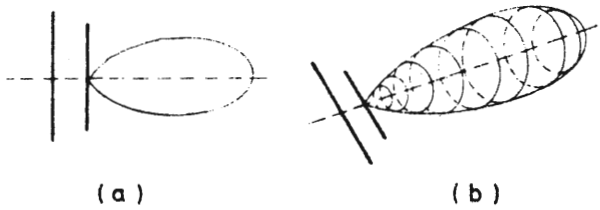


Fig. 3.- Antenna unidirezionale: a) lobo orizzontale; b) lobo visto in prospettiva.

radiazione verso alcuni punti rispetto ad altri.

L'antenna isotropica situata nel punto O della sfera la comprenderà tutta, mentre una antenna direzionale situata nello stesso punto irradierà l'energia solo dalla parte verso cui è puntata, e questa si ripartirà poi su tutta la sfera.

Riportando questo caso su di una superficie più piccola, si nota che l'intensità del segnale sarà maggiore rispetto al caso precedente.

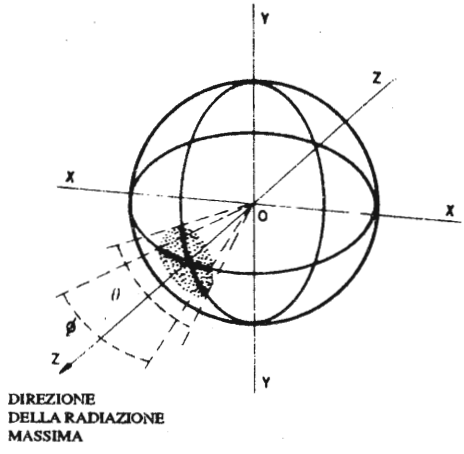


Fig. 4.- Un irradiatore isotropico posto nel punto O illuminerà tutta la sfera. Una antenna direzionale posta nello stesso punto concentra tutta la potenza nella zona ombreggiata, essendo il guadagno di potenza pari alla superficie totale dell'antenna, divisa per l'area ombreggiata.

Il guadagno in potenza di una antenna sul radiatore isotropico viene dato dalla equazione:

$$\frac{52.500}{\Phi \times \Theta}$$

e dove $\Phi \times \Theta$ rappresenta l'area dell'ellisse.

Il guadagno di un'antenna è il rapporto (o coefficiente) tra la potenza fornita all'antenna, e quella che dobbiamo fornire al radiatore isotropico per ottenere la stessa quantità di campo in un punto comune ai due lobi (situato nella direzione del lobo principale dell'antenna).

Il guadagno di una antenna viene espresso in dB.

Nella figura abbiamo un grafico in scala semilogaritmica per la conver-

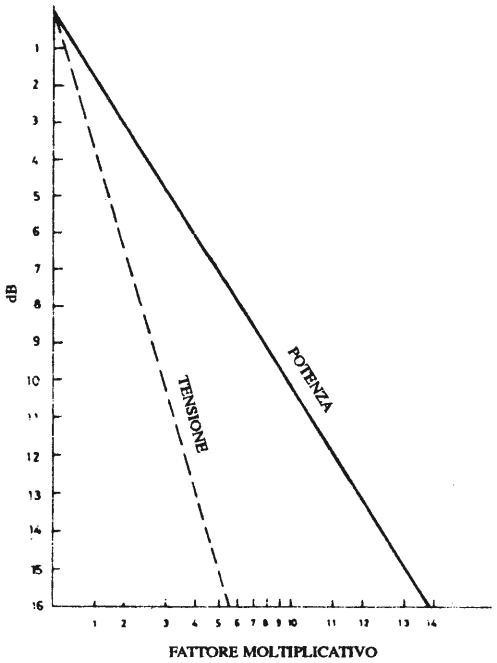


Fig. 5.- Grafico di conversione dei fattori di moltiplicazione della potenza e della tensione in guadagno (in dB), e viceversa.

sione del fattore moltiplicativo della potenza o della tensione in guadagno, espresso in dB.

Precisazioni sulla polarizzazione di antenna

Nel capitolo 1 abbiamo trattato alcuni argomenti relativi alla polarizzazione di un'antenna. Come complemento a quanto esposto in quella sede, aggiungiamo i concetti che seguono:

- l'intensità di campo elettrico ha la stessa direzione dell'antenna. Se l'antenna emittente è verticale, le linee di forza elettrica sono verticali, e si parla in tal caso di polarizzazione verticale. Per la ricezione di un'onda polarizzata verticalmente è necessaria quindi, una antenna verticale.

Dato che una antenna verticale irradia uniformemente in tutte le direzioni, risulta la più appropriata per la radio. Tuttavia, per le onde ultracorte (emissione in FM), si utilizza la polarizzazione orizzontale.

Il motivo di ciò, deriva dal fatto che la polarizzazione orizzontale fornisce un minore livello di rumori, perturbazioni, spurie, e maggior portata nella

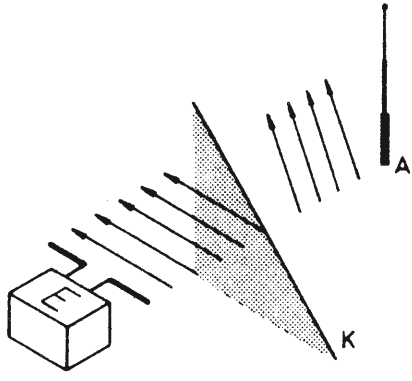


Fig. 6.- L'emittente E trasmette con polarizzazione orizzontale. Tuttavia, l'antenna verticale dell'automobile capta grazie alla rotazione di 90° dovuta all'onda di riflessione e di rifrazione causata dalle parti metalliche della macchina.

trasmissione. D'altra parte, le onde polarizzate verticalmente sono fortemente assorbite o riflesse dagli ostacoli esistenti tra emittenti e riceventi.

Dopo queste affermazioni, sicuramente il lettore si chiederà come è allora possibile captare delle onde radio ultracorte polarizzate orizzontalmente, con l'antenna verticale dell'automobile.

La spiegazione di questo fatto è data dalla riflessione e dalla rifrazione delle onde radio, che avviene principalmente sulle parti metalliche della vettura, le quali creano un giro di polarizzazione.

Le onde emesse dall'antenna emittente E, polarizzata orizzontalmente, raggiungono il bordo K. Questo bordo agisce come un radiatore secondario, e l'onda irradiata dal bordo cambia la sua polarizzazione, e viene captata dall'antenna.

A causa del fatto che la direzione della polarizzazione non è esattamente definita, la tensione indotta nell'antenna è molto più piccola di quanto potrebbe essere, se l'antenna ricevente fosse orizzontale.

Effetto direzionale delle antenne

Si è già detto precedentemente che un dipolo ha una caratteristica di irradiazione orizzontale che assomiglia ad un 8. L'antenna irradia, quindi, con la massima intensità verso destra e sinistra in Fig. 7.

La stessa cosa avviene nel caso di antenne riceventi, che capteranno con la massima intensità i segnali provenienti dalla destra o dalla sinistra; questo poiché l'antenna ha sempre caratteristiche sia emittenti che riceventi.

Se si dispone in parallelo al dipolo un elemento R che non sia elettricamente unito alla linea dell'antenna, questo agisce come riflettore. Con questa disposizione, si altera la caratteristica radiante dell'antenna, che si allarga verso destra.

Se si tratta di una antenna ricevente, questa capterà meglio i segnali provenienti dalla destra, e peggiorerà la ricezione di quelli di sinistra.

Aggiungendo quindi un elemento riflettente all'antenna, questa diviene direzionale, e migliora la ricezione quando si trova puntata in una determinata direzione.

A grandi linee, il funzionamento di una antenna a dipolo dotata di un elemento riflettente è il seguente: le onde provenienti dall'emittente E, inducono nel dipolo e nel riflettore una circolazione di corrente di antenna.

Ogni antenna che viene percorsa da una corrente indotta o applicata, si trasforma in antenna emittente, irradiando parte dell'energia in alta frequenza ricevuta.

Il dipolo, quindi, capta non solo l'onda proveniente dall'emittente, ma

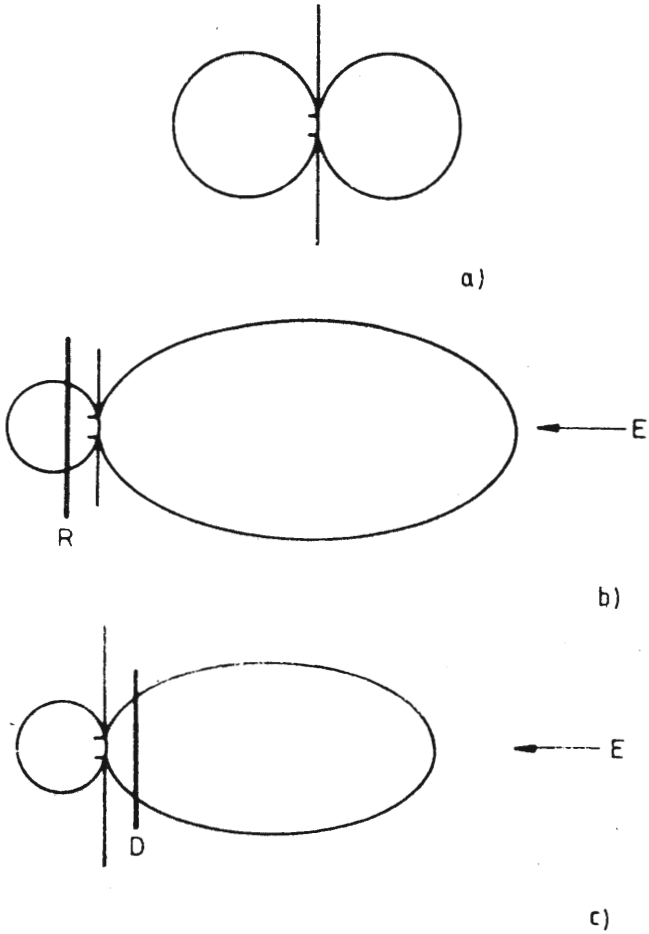


Fig. 7.- Caratteristica di irradiazone orizzontale: a) di un dipolo; b) di un dipolo con elemento riflettente R; c) di un dipolo con elemento direttivo D, tra questo e l'emittente.

anche quella nuovamente irradiata dall'elemento riflettente. Il riflettore capta, a sua volta, due irradiazioni, una proveniente dall'emittente, e l'altra proveniente dal dipolo, creando così una differenza di fase tra le correnti indotte.

Come conseguenza di tutto questo, per le onde provenienti da E, le correnti che si inducono nel dipolo si sommano, mentre per le onde provenienti dalla direzione opposta, le correnti che si inducono nel dipolo, si annullano quasi totalmente.

Si osservi che l'elemento riflettente R è un po' più largo del dipolo, e viene regolato a una frequenza di risonanza leggermente inferiore a quest'ultimo.

Questo per far sì che la tensione e la corrente abbiano fasi diverse.

Un altro sistema per ottenere un effetto direzionale dell'antenna, è quello di posizionare di fronte al dipolo, tra questo e l'emittente, un elemento leggermente più corto dell'antenna, che prende il nome di *direttore*. Questo elemento, in un certo modo, dirige le onde verso il dipolo.

Una antenna a dipolo può essere realizzata con diversi direttori, ottenendo così una *antenna Yagi*, della quale parleremo molto approfonditamente nei capitoli 5 e 6.

L'effetto direzionale di un'antenna viene espresso dal rapporto anteriore-posteriore. Per ottenere questa relazione si misura la tensione di ricezione, quando l'antenna è diretta esattamente verso l'emittente.

In seguito, si fa ruotare l'antenna di 180° e si misura nuovamente la tensione di ricezione. Il rapporto tra queste due tensioni corrisponde a quello detto anteriore-posteriore, o avanti-dietro.

In una antenna a dipolo senza alcun elemento riflettente e senza direttori, il rapporto anteriore-posteriore è di 1:1, posto che la caratteristica di irradiazione o di ricezione sia uguale nelle due direzioni.

In un dipolo dotato di elemento riflettente, il rapporto anteriore-posteriore è approssimativamente di 3:1, e in un dipolo con elementi riflettenti e direttivi è di 6:1.

Il rapporto anteriore-posteriore viene generalmente espresso in decibel, tramite l'equazione:

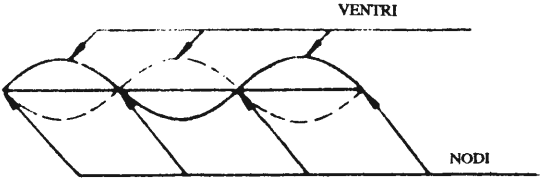


Fig. 8.- In una antenna la cui lunghezza sia di 3/2 della lunghezza d'onda, si generano tre ventri e quattro nodi.

$$dB = 20 \times \log \frac{A}{P}$$

Così, una antenna a dipolo con elemento riflettente e direttivo, il cui rapporto anteriore-posteriore è stato valutato in 6:1, secondo l'espressione data precedentemente, risulterà avere il seguente valore in dB:

$$20 \times \log \frac{6}{1} = 20 \log 6 = 20 \times 0{,}7782 \approx 16 \text{ dB}$$

Guadagno d'antenna

Il *guadagno* di una antenna esprime il numero di volte che la tensione indotta nell'antenna è maggiore di quella in un dipolo semplice.

In una antenna a più elementi, non solo aumenta il rapporto anteriore-posteriore, ma anche il guadagno di antenna.

E' molto importante non confondere il rapporto anteriore- posteriore con il guadagno d'antenna.

Mentre il rapporto anteriore-posteriore confronta la tensione di ricezione dell'antenna, quando questa è diretta verso l'emittente, con la tensione di ricezione, quando questa è posta in direzione opposta, il guadagno di antenna confronta la tensione di ricezione di una determinata antenna diretta verso l'emittente, con la tensione di ricezione di un dipolo semplice situato nello stesso punto e con la stessa direzione.

Il guadagno d'antenna viene espresso in dB, poiché vengono confrontate due grandezze della stessa natura. L'equazione che lo fornisce è data da:

$$dB = 20 \times \log \frac{V_2}{V_1}$$

dove V_2 è la tensione di ricezione dell'antenna considerata, e V_1 la tensione di ricezione del dipolo semplice.

Lunghezza dell'antenna

Si è già detto che le dimensioni di una antenna vengono determinate dal-

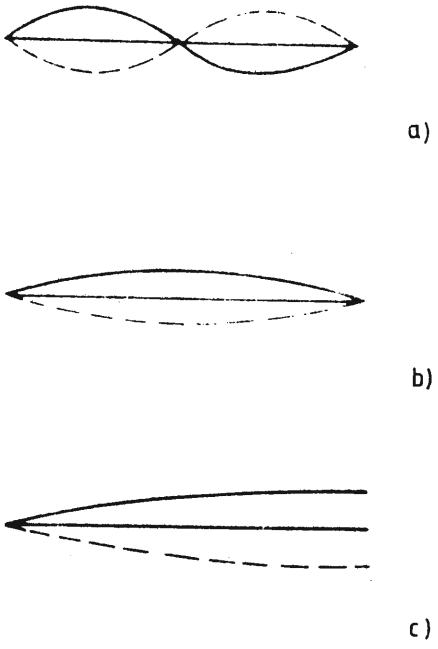


Fig. 9.- Ventri e nodi per diverse lunghezze d'antenna: a) se la lunghezza è λ si generano due ventri e tre nodi; b) nel caso di λ/2 si generano un ventre e due nodi; c) in una antenna di lunghezza λ/4 si generano un solo ventre e un solo nodo.

la frequenza dell'emissione che devono captare, per essere più precisi dalla lunghezza d'onda della citata frequenza. E' molto importante conoscere il perché di questo fatto, che esporremo in seguito.

La frequenza di risonanza di una antenna può essere confrontata con quella di una bacchetta metallica fissata ai suoi estremi, e fatta vibrare a diverse frequenze. Così, nel caso di Fig. 8, la forma dell'oscillazione è di un periodo e mezzo, la lunghezza dell'antenna è di 3λ/2, e si vengono a creare tre ventri, o ampiezze massime, e quattro nodi, o ampiezze nulle.

Nel caso (a) di Fig. 9, la lunghezza dell'antenna è λ, e si formano due ventri e tre nodi, mentre nel caso (b) la lunghezza dell'antenna è λ/2, con un solo ventre e due nodi.

Si osservi che in tutti i casi esposti, due dei nodi coincidono con i punti di fissaggio della bacchetta, e che il numero di questi è uguale a quello dei ven-

tri più uno.

Supponiamo ora che la bacchetta sia fissata ad un solo estremo. In questo caso, la lunghezza di antenna corrisponde a $\lambda/4$, e cioè a un quarto di periodo, per cui si formano un solo ventre e un solo nodo.

In radiofrequenza, oltre alle particolarità sopra esposte, si hanno due onde, una di corrente e l'altra di tensione, in modo tale che il ventre di una coincida con il nodo dell'altra.

Il sistema di nodi e ventri che si stabilizzano su di una antenna sintonizzata, viene definito distribuzione delle onde stazionarie o *onde stazionarie*.

Inoltre, occorre dire che, come in qualsiasi altro circuito risonante, si ha una vibrazione fondamentale e tutta una serie di vibrazioni armoniche dispari rispetto a quella fondamentale.

In questo modo, considerando la vibrazione di Fig. 10 di lunghezza λ, si ha anche la terza armonica, la cui lunghezza d'onda è $\lambda/3$, la quinta armonica, la cui lunghezza è di $\lambda/5$, ecc.

In una antenna con un polo messo a terra (antenna Marconi), si produce un solo nodo di corrente e un solo ventre di tensione sull'estremo libero, e un

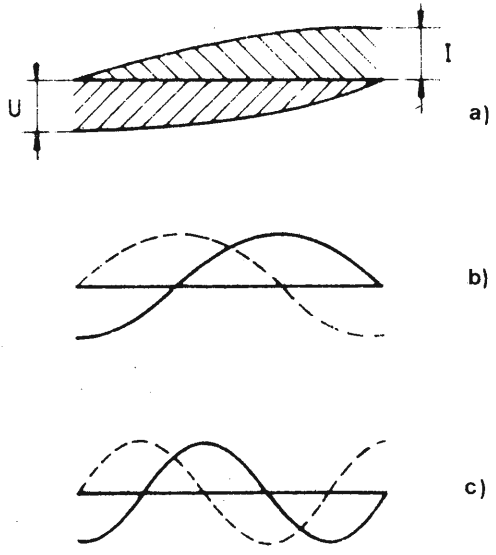


Fig. 10.- a) In una antenna di un quarto della lunghezza d'onda, il nodo di tensione coincide con il ventre di corrente e viceversa. b) Distribuzione della tensione e della corrente della terza armonica. c) Distribuzione della tensione e della corrente della quinta armonica

solo ventre di corrente e un solo nodo di tensione sull'estremo posto a terra.

Se l'antenna non è connessa a terra, l'oscillazione fondamentale si stabilizza per il semiperiodo, ragione per cui viene anche definita *antenna a mezza onda.*

In queste antenne, i nodi di corrente si trovano agli estremi, e il nodo di tensione al centro. Nella Fig. 11, è stato rappresentato il semiciclo dell'onda di tensione con una linea continua, e il semiciclo dell'onda di corrente con una linea tratteggiata.

Da quanto esposto, si deduce che un'antenna può entrare in risonanza solo a certe frequenze ben determinate: a quella fondamentale, e a quelle di alcune sue armoniche.

La lunghezza elettrica dell'antenna viene quindi determinata dalla lunghezza d'onda o frequenza del segnale, essendo questa lunghezza un quarto di onda o mezza onda.

Nel caso di una antenna a un quarto di onda, la lunghezza elettrica viene determinata tramite l'equazione:

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{\frac{300.000}{f}}{4} = \frac{75.000}{f}$$

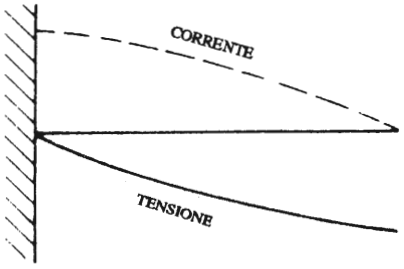


Fig. 11.- Distribuzione dei nodi di tensione e dei ventri di corrente in una antenna Marconi.

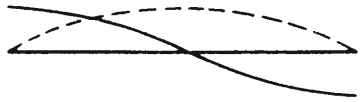


Fig. 12.- In una antenna non connessa a terra (mezza onda), i nodi di corrente si trovano sugli estremi, e il nodo di tensione al centro.

dove f è la frequenza del segnale in KHz.

Nel caso di frequenze molto elevate, come quelle utilizzate in FM, l'equazione può essere scritta come:

$$L = \frac{75}{f}$$

dove f è ancora la frequenza che si desidera sintonizzare, espressa in MHz.

Per antenne in mezza onda la lunghezza viene data dalla equazione:

$$L = \frac{\frac{300.000}{\lambda}}{2} = \frac{\frac{f}{2}}{2} = \frac{150.000}{f}$$

(f in KHz), o anche:

$$L = \frac{150}{f}$$

quando f viene data in MHz.

Prima abbiamo definito la lunghezza elettrica dell'antenna, che non corrisponde con la lunghezza materiale della stessa, per via dei punti isolanti di fissaggio che non sono isolanti perfetti; la lunghezza reale delle antenne si riduce approssimativamente del 5 % rispetto alla lunghezza elettrica.

In questo modo, nel caso di antenne a un quarto di onda, la lunghezza reale della stessa si ottiene tramite l'equazione:

$$L_{reale} = \frac{75 - \frac{75 \times 5}{100}}{f(\text{in MHz})} = \frac{71{,}25}{f(\text{in MHz})}$$

e nel caso di antenne di mezza onda, con l'equazione:

$$L_{reale} = \frac{150 - \frac{150 \times 5}{100}}{f(\text{in MHz})} = \frac{142{,}5}{f(\text{in MHz})}$$

I valori utilizzati in pratica sono:

- Per antenne a un quarto di onda:

$$L_{reale} = \frac{71{,}5}{f(\text{in MHz})}$$

- Per antenne a mezza onda:

$$L_{reale} = \frac{143}{f(\text{in MHz})}$$

tenendo sempre presente il fattore di correzione K definito nel capitolo precedente.

Punto di connessione di una antenna

Nel paragrafo riferito all'impedenza di antenna, si sono sviluppati alcuni concetti relativi alle possibili modalità di connessione della linea di trasmissione all'antenna. Nel presente paragrafo daremo alcune nozioni complementari su questo tema, soprattutto in forma grafica, considerando che sono in stretta relazione con l'aspetto della direttività che abbiamo sviluppa-

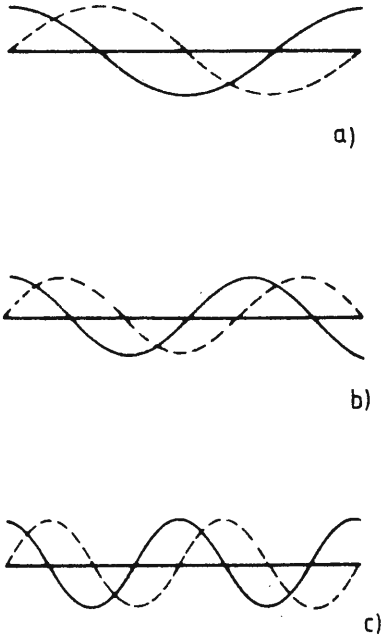


Fig. 13.- Diagramma delle onde stazionarie in una antenna ad onda media: a) seconda armonica; b) terza armonica; c) quarta armonica.

to, così come con le differenti modulazioni di frequenze che l'antenna può emettere o ricevere.

Il punto di connessione di una antenna con il ricevitore è , per regola generale, coincidente con un ventre di corrente.

In questo modo, in una antenna verticale con un estremo connesso a terra, o antenna a un quarto di onda, il punto di alimentazione si realizza molto vicino all'estremo connesso a terra.

Nelle antenne a mezza onda, il punto di alimentazione viene situato nel centro geometrico dell'antenna, poiché in questo punto si realizza il ventre di corrente.

Quando l'antenna deve ricevere una frequenza che non è quella fondamentale per la quale è stata progettata, ma una delle sue armoniche, il punto di alimentazione andrà a situarsi in un punto tale che coincida con un ventre di corrente.

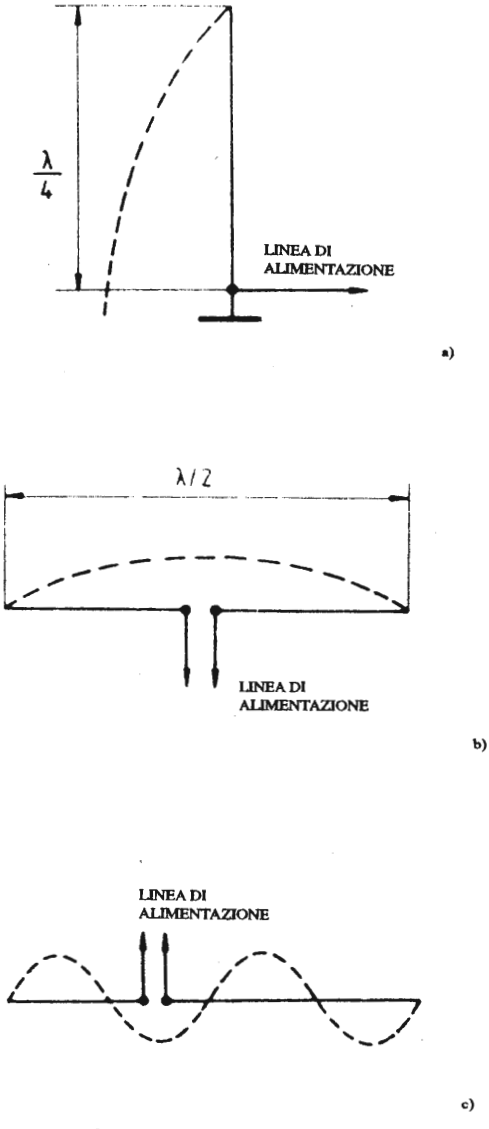


Fig. 14.- Punti di connesione in fuzione del tipo di antenna: a) antenna verticale di un quarto di lunghezza d'onda; b) antenna di mezza lunghezza d'onda; c) quando l'antenna deve ricevere una frequenza che non è quella fondamentale, ma una delle armoniche, il punto di alimentazione sarà coincidente con un ventre di corrente..

L'antenna a dipolo

Per concludere questo capitolo, si forniscono, come piccola introduzione, le nozioni più elementari riguardanti le antenne a dipolo, dal momento che le loro caratteristiche sono così universali, che il non conoscerle impedisce lo studio dei casi successivi.

In questo modo, il lettore sarà motivato ad affrontare lo studio delle differenti classi di antenne, che inizierà a partire dal prossimo capitolo.

L'antenna a dipolo o antenna a mezza onda, è una delle più semplici, ed è formata da un solo filo, la cui lunghezza approssimativa è di mezza lunghezza d'onda; a partire da questa, come si vedrà più avanti, si sono realizzate altre antenne più complesse.

La resistenza di irradiazione di una antenna a dipolo nello spazio è di 73 Ω, sempre che il rapporto tra la sua lunghezza fisica e il diametro del conduttore con il quale è stata realizzata sia molto grande.

Si può considerare che la sua resistenza può variare tra 50 e 73 Ω nei casi pratici, in quanto dipende da diverse circostanze, come la sua costruzione fisica (isolatori, conduttori), e la sua installazione (posizione rispetto al terreno).

La resistenza di irradiazione, o *impedenza*, dipende per una piccola parte dal conduttore utilizzato; se si utilizza un conduttore di grande diametro, la

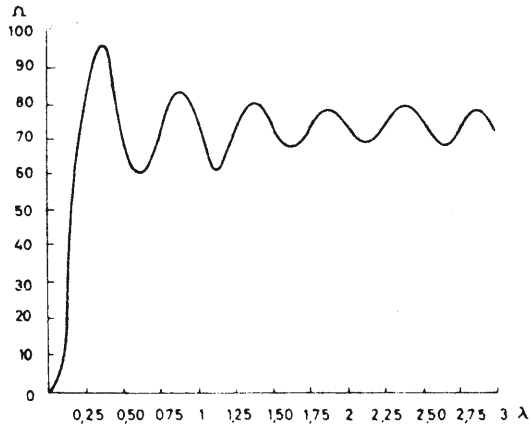


Fig. 15.- Variazione della resistenza di irradiazione di un dipolo orizzontale in funzione della sua separazione dal terreno, espresso in lunghezze d'onda.

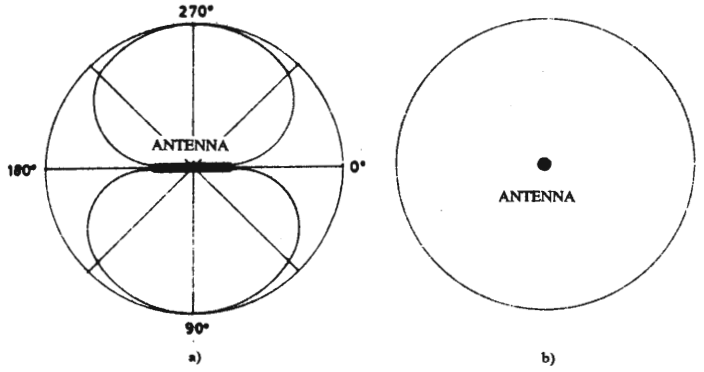


Fig. 16.- Diagramma di irradiazione orizzontale: a) dipolo orizzontale; b) dipolo verticale.

capacità dell'antenna aumenta, mentre diminuisce l'induttanza. Il maggior rapporto induttanza/capacità, fa sì che l'antenna abbia un Q più alto, e la sua larghezza di banda viene limitata a pochi KHz, e viceversa.

Per frequenze di circa 30 MHz, il calcolo della lunghezza di una antenna a dipolo risulta sufficientemente esatto se si utilizza l'equazione:

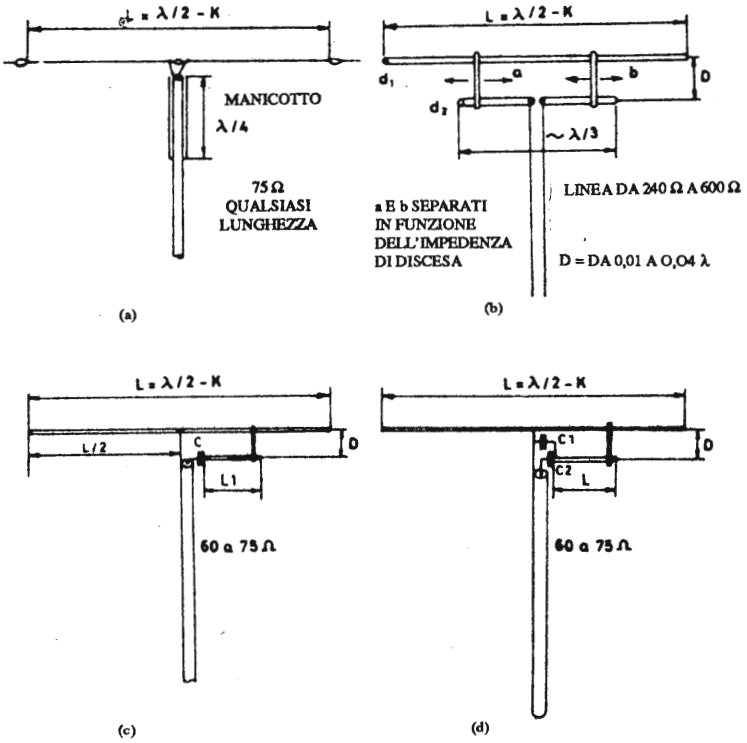
$$L = \frac{150 \times K}{f(\text{in MHz})} = \frac{150 \times 0{,}95}{f} = \frac{142{,}5}{f}$$

L = lunghezza del dipolo in metri.

K è una costante nella quale interviene il rapporto diametro/lunghezza; K = 0,93 per un rapporto 10; K = 0,94 per un rapporto 20; K = 0,95 per un rapporto 25; K = 0,96 per un rapporto 75. Per rapporti maggiori può essere utilizzato K = 0,97.

Un esempio pratico di calcolo si può avere progettando una antenna per la frequenza di 14,250 MHz: detta antenna avrà una lunghezza di 142,5 diviso per 14,250, che dà 10 metri.

La lunghezza totale dell'antenna deve essere misurata da estremo a estremo dei conduttori, ossia, misurando la lunghezza dei due fili conduttori più lontani dagli isolatori di spaziamento centrali.



polo verticale.
Fig. 17.- Dipolo con adattamenti a diverse linee: a) su linee a 75 Ω; b) adattamento per una linea aperta; c) adattamento gamma. d) adattamento omega.

Il lobo di irradiazione del dipolo non è uniforme, per cui la massima irradiazione si realizza in funzione della perpendicolare al punto medio, decresce verso i suoi estremi, fino ad annullarsi lungo la direzione dello stesso.

Ci sono diverse posizioni per poter collocare un dipolo rispetto al terreno; le più importanti sono quella orizzontale e quella verticale.

Quando è orizzontale, l'intensità del campo dipende dalla posizione del punto di ricezione rispetto all'antenna; nel caso di dipolo in posizione verticale, la posizione del punto di ricezione non influenzerà l'intensità del campo ricevuto, poiché l'irradiazione del dipolo verticale è uniforme nel piano orizzontale.

Per alimentare una antenna a dipolo, si può agire in modi differenti.

Quando viene alimentata in potenza, la corrente sarà massima al centro, e andrà decrescendo, fino ad annullarsi, agli estremi. La tensione sarà massima agli estremi e nulla al centro, dove l'impedenza o resistenza di irradiazione è approssimativamente di 70 Ω, per cui sarà più semplice alimentare l'antenna con una linea a 75 Ω, che sia aperta o coassiale.

Se si utilizza una linea coassiale, si dovrà intercalare un bilanciatore per ottenere la simmetria, poiché se non si procede alla sua installazione, si passerà da una linea squilibrata a una antenna equilibrata, producendo una deviazione nel lobo di irradiazione, e nella circolazione delle correnti per la calza del coassiale.

Tutto quanto detto è riferito ad una antenna a dipolo realizzata con filo di rame da 1 a 2 mm di diametro, con le punte e il centro isolati per mezzo di isolatori. A titolo orientativo, le misure per diversi dipoli, in funzione delle frequenze sono:

- da 3,5 a 3,8 MHz = 36,90 m;
- da 7 a 7,3 MHz = 19,97 m;
- da 14 a 14,3 MHz = 10,06 m;
- da 21 a 21,4 MHz = 6,74 m;
- da 28 a 30 MHz = 4,97 m.

CAPITOLO 4

DIPOLI E ANTENNE A FILO LUNGO

I concetti che sono stati esposti al termine del capitolo precedente, relativi ai dipoli elettrici e antenne a dipoli, costituiscono i fondamenti teorici della maggior parte delle moderne antenne, per tutte le classi di applicazione, tanto in emissione come in ricezione.

Tenendo conto della vasta gamma esistente, abbiamo cercato di dare una classificazione logica che ne faciliti lo studio, in modo tale da affrontare, per prima, l'antenna dalle concezioni più semplici per proseguire progressivamente verso quelle maggiormente complesse.

Per le ragioni esposte, si inizia l'analisi con le differenti gamme di antenne a dipoli, così come con quelle definite *antenne a filo lungo*, riservando per altri capitoli successivi le altre modulazioni.

Antenna a dipolo semplice per FM

Le emissioni radiodiffuse in FM vengono effettuate nella II banda VHF, con frequenze comprese tra 87,5 e 100 MHz.

L'antenna più semplice che può essere utilizzata per queste frequenze, è il dipolo semplice polarizzato orizzontalmente, con una lunghezza del ramo di 76 cm, e una separazione fra i rami di circa 5 cm.

L'impedenza di questa antenna è di 73 Ω, anche se per utilizzi pratici si considera di 75 Ω, e capta la massima energia quando il segnale incide perpendicolarmente su di essa.

Vediamo ora il perché di questa lunghezza di 76 cm di ciascun ramo. Come il lettore comprenderà, non è redditizio costruire una antenna per ciascuna

frequenza della II banda, ragione per la quale si costruiscono per la frequenza centrale, che è determinata dalla equazione:

$$f_c = \frac{f_{sup} + f_{inf}}{2} = \frac{100 + 87{,}5}{2} \approx 94 \text{ MHz}$$

Per questa frequenza di 94 MHz la lunghezza d'onda è di:

$$\lambda = \frac{300.000.000}{94 \text{ MHz}} \approx 3{,}2 \text{ m}$$

Siccome la lunghezza elettrica dell'antenna a dipolo deve essere, in funzione di quanto si è esposto, $\lambda/2$, si ottiene una lunghezza totale di antenna di:

$$L_{reale} = \frac{\lambda}{2} = \frac{3{,}2 \text{ m}}{2} = 1{,}6 \text{ m}$$

La lunghezza reale dell'antenna deve essere, tuttavia, del 5% inferiore, per i motivi già esposti nei paragrafi precedenti, per cui si ottiene:

$$L_{reale} = 1{,}6 - \frac{1{,}6 \times 5}{100} = 1{,}6 - \frac{8}{100} = 1{,}52 \text{ m}$$

Dividendo ancora 1,52 m per 2 si ottiene la lunghezza reale di ciascuno

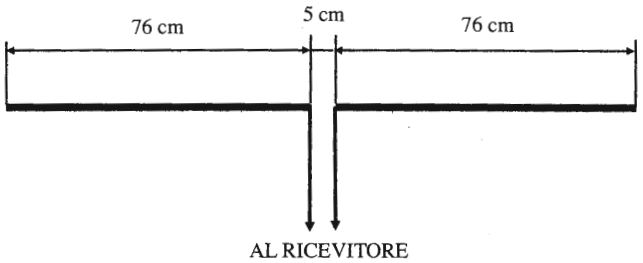


Fig. 1.- Dimensioni di una antenna a dipolo semplice per FM.

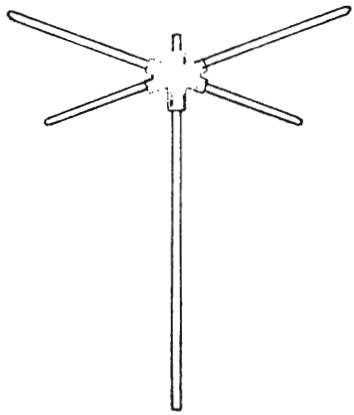


Fig. 2.- Antenna per FM omnidirezionale, costituita da due dipoli semplici posti perpendicolarmente tra loro.

dei bracci dell'antenna; nel caso trattato:

$$L_{\text{reale di ciascun braccio}} = \frac{1{,}52 \text{ m}}{2} = 0{,}76 \text{ m} = 76 \text{ cm}$$

L'antenna a dipolo che abbiamo descritto, appartiene al gruppo delle antenne bidirezionali, poiché può ricevere solamente segnali provenienti da emittenti situate davanti e dietro al dipolo.

Una antenna per FM omnidirezionale basata sugli stessi principi citati, è quella mostrata in Fig. 2.

Come si può notare, è costituita da due dipoli situati perpendicolarmente uno rispetto all'altro, che permettono la ricezione di emissioni da tutte le direzioni.

Il materiale con il quale si costruiscono queste antenne è il tubo di alluminio, poiché ha il vantaggio di essere poco pesante, di non deteriorarsi per le intemperie, di essere un buon conduttore di elettricità, e di avere un prezzo contenuto.

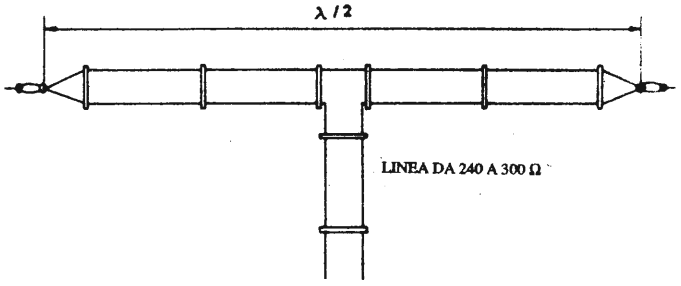


Fig. 3.- Dipolo bifilare piegato, alimentato con una linea aperta.

Dipolo piegato

Questa antenna è costruita con due conduttori paralleli, come se si trattasse di una linea aperta, con gli estremi cortocircuitati; la discesa si connette con il centro di uno dei conduttori.

La lunghezza tra gli estremi è la stessa che per il dipolo unifilare, essendo l'impedenza una delle principali caratteristiche del dipolo piegato (circa 240 Ω), che ne permette la connessione a una linea di trasmissione di 300 Ω.

Nel caso di un dipolo piegato, la corrente si divide tra i due conduttori, e la resistenza risulta moltiplicata per quattro; se si hanno più conduttori nel dipolo, la corrente si divide per il numero di questi, e la resistenza viene moltiplicata per il numero dei conduttori elevato al quadrato.

E' possibile costruire un dipolo piegato utilizzando semplicemente una

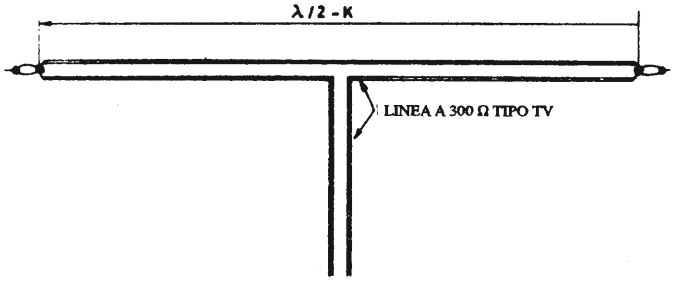


Fig. 4.- Dipolo piegato realizzato con una linea a 300 Ω tipo TV.

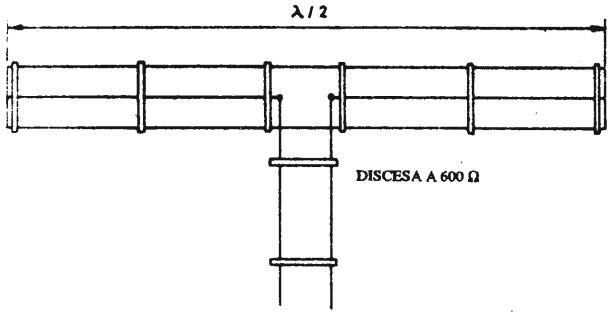


Fig. 5.- Dipolo trifilare.

piattina da 300 Ω, del tipo utilizzato per discese TV; in questo caso per il calcolo della sua lunghezza occorre tener conto del fattore di velocità della linea.

Se abbiamo una linea di trasmissione, o discesa, a 600 Ω e desideriamo utilizzarla, possiamo realizzare un dipolo trifilare, adottando un dipolo normale al quale si aggiungono, a corta distanza e in parallelo, due cavi o fili della stessa lunghezza.

L'impedenza nel centro di un dipolo unifilare è di circa 70 Ω, ma appena ci si allontana, questa aumenterà, in modo che, se si pone la discesa in due

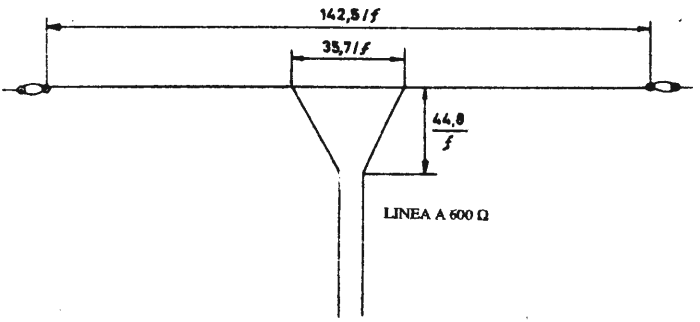


Fig. 6.- Adattamento delta per linee a 600 Ω.

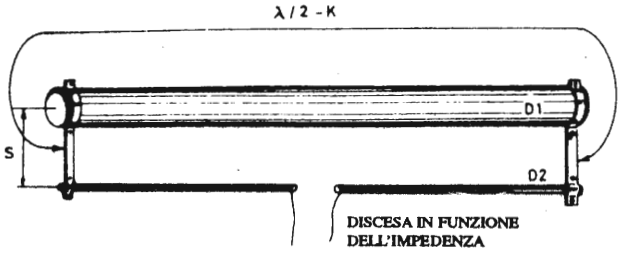


Fig. 7.- Dipolo con rapporto di diametri

punti equidistanti dal centro e separati tra loro da una distanza in metri pari a 35,7, ricavato dalla frequenza in MHz, avremo 600 Ω per poter connettere una linea di discesa di questa impedenza.

Questo sistema di adattamento è conosciuto con il nome di *delta* per la sua forma caratteristica; il principale vantaggio che presenta rispetto al dipolo protetto, è che non necessita dell'isolatore centrale, dando maggior rigidezza, ed evitando le perdite che possono verificarsi specialmente con grandi potenze, umidità, polvere, ecc.

E' possibile ottenere maggiori rapporti di impedenza, partendo da dipoli piegati in cui i due conduttori hanno differenti diametri. L'equazione che permette di determinare questa relazione è:

$$R = 1 + (Z_1 / Z_2)^2$$

nella quale Z_1 è l'impedenza caratteristica di una linea aperta, i cui conduttori hanno un diametro uguale al conduttore più sottile del dipolo, e la separazione è uguale alla distanza tra i centri dei conduttori del dipolo; Z_2 è l'impedenza della linea formata da due conduttori di diametro uguale al conduttore più spesso del dipolo, con la stessa separazione.

Se occorre un aumento dell'impedenza, la discesa viene connessa al conduttore sottile; per ottenere una diminuzione, la discesa viene connessa al conduttore spesso.

Antenna a dipolo piegato per FM

L'antenna a dipolo piegato, come si è visto, è formata da un anello chiuso e ha il vantaggio, rispetto al dipolo semplice, di non richiedere un punto di

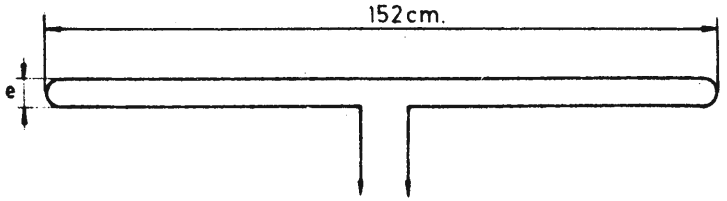


Fig. 8.- Dimensioni di una antenna a dipolo piegato per FM.

fissaggio isolato, poiché l'unione tra il dipolo e il palo di sostegno avviene in un punto già elettricamente isolato.

La lunghezza totale del dipolo piegato per FM si calcola in modo simile a quella del dipolo semplice; il 5% meno della metà della lunghezza d'onda che deve ricevere (se si tratta di una antenna ricevente).

Questo significa che la lunghezza reale del dipolo piegato, nel caso di ricezione nella II banda (radiodiffusione in FM), sarà di 152 cm.

Questa misura va intesa comprensiva delle parti curve dell'antenna.

La distanza di separazione tra i due elementi, deve essere la minore possibile, e deve essere costante sulla lunghezza totale dell'antenna.

Per ottenere un rendimento soddisfacente, è condizione imprescindibile che la distanza di separazione non superi 1/32 del valore della lunghezza d'onda.

In questo modo, per la frequenza di 94 MHz (frequenza centrale della II banda), la cui lunghezza d'onda è di 320 cm, la separazione non deve superare il valore di 10 cm:

$$e < \frac{\lambda}{32} = \frac{320 \text{ cm}}{32} = 10 \text{ cm}$$

Come nel dipolo semplice, la sensibilità del dipolo piegato è massima quando le onde elettromagnetiche incidono su di esso perpendicolarmente.

Nella Fig. 9 è mostrato il metodo costruttivo di una antenna a dipolo piegato per FM, i cui bracci sono stati piegati con lo scopo di ottenere un potere omnidirezionale della stessa.

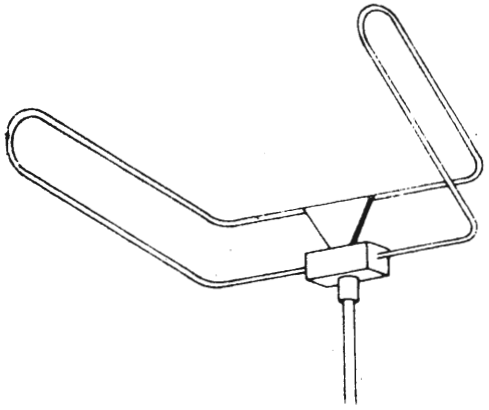


Fig. 9.- Forma costruttiva di una antenna a dipolo piegato omnidirezionale per FM.

Antenne a dipoli piegati con elementi parassiti per FM

Anche se più avanti verrà sviluppato più approfonditamente il tema delle antenne con elementi parassiti, in questo paragrafo vengono fornite le nozioni di base relative all'applicazione di una antenna FM.

Nella Fig. 10 vengono riportate le dimensioni di una antenna a dipolo piegato dotata di un elemento riflettente. La lunghezza di detto elemento è del 5% maggiore di quella del dipolo, vale a dire 159 cm; la distanza di separazio-

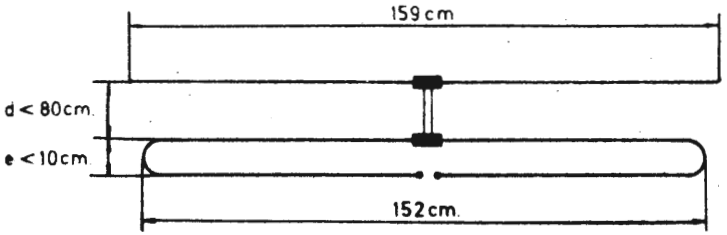


Fig. 10.- Dimensioni di una antenna a dipolo piegato con elemento riflettente per FM.

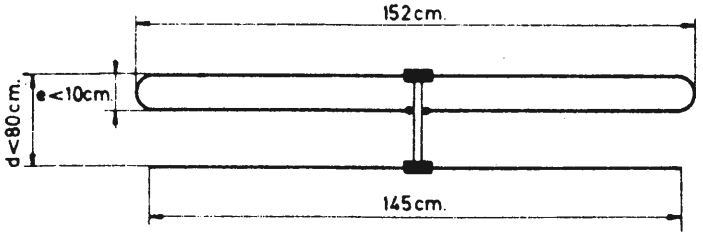


Fig. 11.- Dimensioni di una antenna a dipolo piegato con elemento direttivo per FM.

ne tra il dipolo piegato e l'elemento riflettente deve essere minore di 1/4 della lunghezza d'onda, per cui la separazione massima tra entrambi gli elementi, antenna e riflettore, sarà di:

$$d < \frac{\lambda}{4} = \frac{320\ \text{cm}}{4} = 80\ \text{cm}$$

Il guadagno di questa antenna è da 3 a 4 dB superiore a quello dell'antenna a dipolo senza elemento parassita, e la sua impedenza è di 75 Ω.

Nella Fig. 11 si possono osservare le dimensioni di una antenna a dipolo piegato per la II banda, dotata di elemento direttivo. La lunghezza del direttore è del 5% minore di quella del dipolo, vale a dire circa 145 cm.

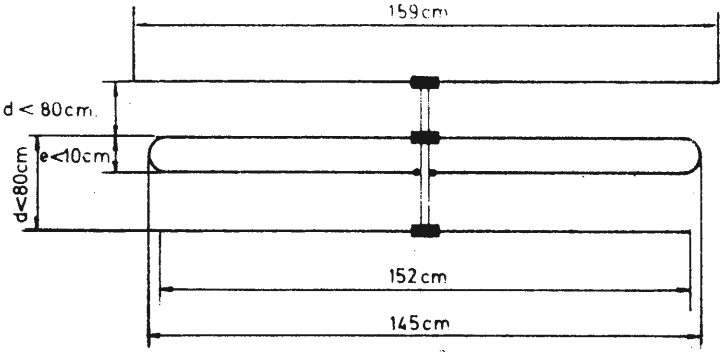


Fig. 12.- Dimensioni di una antenna a dipolo piegato con elemento riflettore e direttore per FM.

Il criterio seguito per la determinazione delle altre dimensioni, è lo stesso sviluppato per l'antenna a dipolo piegato dotata di un elemento riflettente.

Il guadagno di questa antenna è ugualmente da 3 a 4 dB superiore a quella del dipolo semplice, e la sua impedenza è di 75 Ω.

Infine, in Fig. 12 vengono fornite le dimensioni di una antenna a dipolo dotata di elemento riflettente e elemento direttivo. Il guadagno di questa antenna è da 6 a 9 dB superiore a quello dell'antenna a dipolo semplice, e la sua impedenza è di 75 Ω.

Dipoli multibanda

Tutti i dipoli descritti precedentemente funzionano correttamente solo per un margine di frequenza molto ristretto, in modo tale che il radioamatore, per esempio, può utilizzarli solo per una banda ciascuno, e ne ha bisogno di uno per ciascuna delle bande in cui desidera trasmettere.

La proprietà della risonanza di un dipolo, permette di alimentare con la stessa discesa più dipoli risonanti a differenti frequenze: f1 = 3,5 MHz; f2 = 7 MHz; f3 = 14 MHz; f4 = 21 MHz, e f5 = 28 MHz, calcolati con la classica relazione:

$$L = \frac{142{,}5}{f} = \text{lunghezza (in metri)}$$

E' conveniente installare un sistema di adattamento con rapporto 1:1 per passare dalla simmetria dell'antenna alla simmetria della linea coassiale; questa antenna può essere installata tra due punti o pali, tra i quali verranno collocati i diversi dipoli, in modo ordinato, partendo da quello di maggiore lunghezza e terminando con quello più corto, con i loro centri uniti sulla discesa coassiale.

Lavorando con questa antenna, nasce il problema dell'irradiazione delle armoniche, dettaglio che può essere risolto utilizzando un accoppiatore di antenna coassiale-coassiale, installato vicino al trasmettitore, per ottenere il miglior rapporto delle onde stazionarie.

Se si collegano i dipoli in parallelo, e si uniscono in un punto per la discesa, si scopre che non tutti hanno la stessa impedenza, ma differiscono leggermente dai 75 Ω; per compensare queste differenze possiamo utilizzare nel montaggio il sistema mostrato in Fig. 13.

La stessa antenna multibanda può essere realizzata partendo da una li-

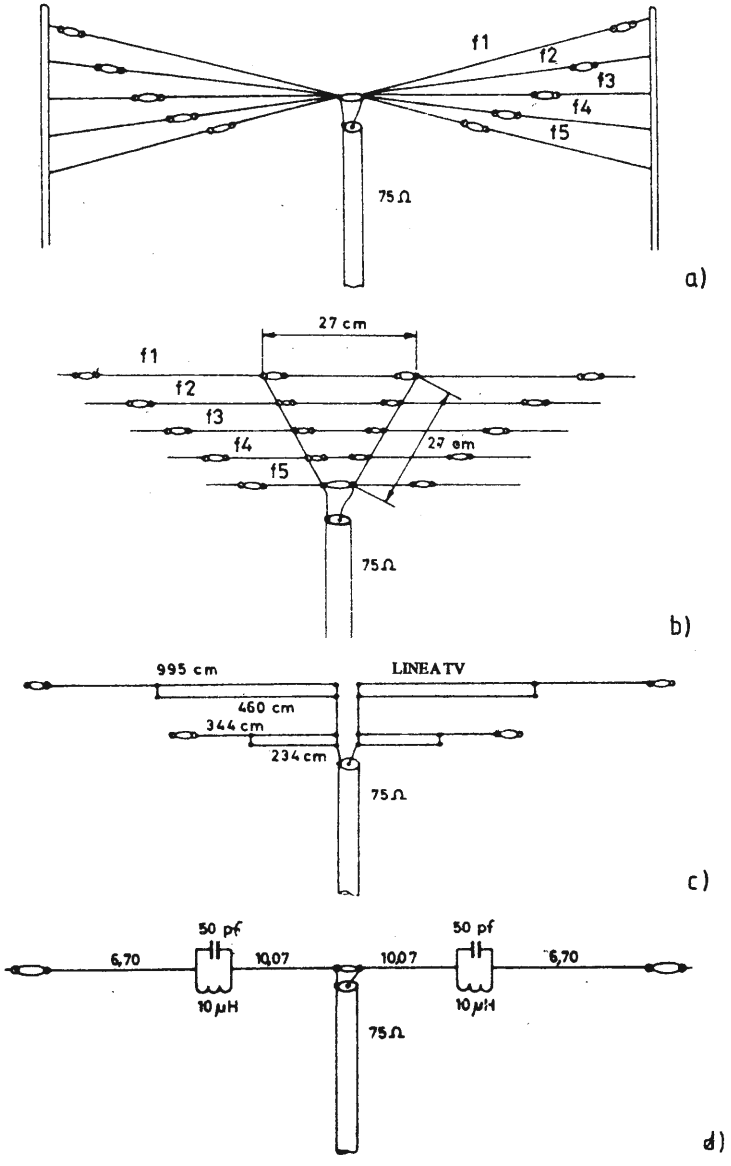


Fig. 13.- Dipoli multibanda: a) vari dipoli risonanti alimentati con la stessa discesa; b) montaggio per compensare le diverse impedenze di ciascun dipolo per la connessione in parallelo; c) montaggio realizzato per una linea a 300 Ω, tipo TV o similare; d) dipolo multibanda con trappole risonanti.

nea di discesa da 300 Ω tipo TV o simile, in modo che serva per 40, 20, 15, e 10 metri.

Per raggiungere la risonanza sulle diverse frequenze, altri tipi di antenne utilizzano il sistema a trappole sintonizzate in parallelo, installate simmetricamente rispetto al punto centrale, nelle vicinanze di ciascuna diramazione; alla frequenza di risonanza la trappola agisce come un isolatore, scollegando la parte di antenna esterna a questa.

Alle frequenze più basse rispetto a quella di risonanza, agiscono come carico; questo corrisponde a un allungamento dell'antenna, che permette di accorciare il dipolo per la frequenza più bassa.

Una antenna adatta per lavorare in tutte le bande HF è quella mostrata in figura; in questa, le trappole risuonano a 7,1 MHz, e sono costruite con una bobina di 10 spire di filo di rame di 2 mm di diametro, avvolta su di un nucleo di 63 mm di diametro, lungo 43 mm.

In parallelo si pone un condensatore da 50 pF con isolamento per tensioni da 5.000 a 10.000 Volt, che permette di lavorare a 500 o 1000 Watt di potenza.

Per ottimizzare il complesso, è consigliabile regolare sperimentalmente le trappole, cosa che può essere effettuata con un misuratore di griglia (grid dip); una volta verificate le trappole, è opportuno proteggerle dalla pioggia e dalla polvere, avvolgendole con materiali plastici ad alto potere dielettrico.

Antenne a filo lungo

L'antenna direzionale più semplice è un filo lungo, la cui lunghezza sarà equivalente a diverse lunghezze d'onda. A rendere unica questa antenna, è il fatto che le sue caratteristiche e il suo rendimento non possono essere comparati a quelle che utilizzano la combinazione di diversi fili, e presenta in alcuni casi delle caratteristiche molto interessanti.

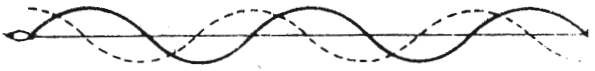


Fig. 14.- Distribuzione della corrente (linea continua), e della tensione (linea tratteggiata) nei differenti punti di un conduttore lungo.

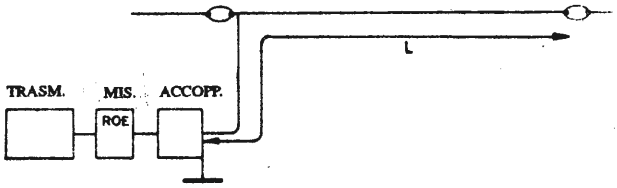


Fig. 15.- Antenna di Hertz alimentata ad un estremo. L = mezza lunghezza d'onda, alla frequenza di lavoro più bassa.

Per raggiungere la risonanza in una antenna a filo lungo, occorre fare in modo che la sua lunghezza sia tale che su di essa possano essere misurate diverse mezze lunghezze d'onda, vale a dire, la lunghezza di una antenna a filo lungo sarà maggiore rispetto a un multiplo di mezza lunghezza d'onda.

Questa lunghezza non è esattamente la somma delle lunghezze delle varie antenne a mezza onda.

L'equazione per calcolare una antenna di questo tipo è:

$$L = \frac{150 \times (N - 0{,}05)}{f}$$

nella quale:

L = lunghezza in metri

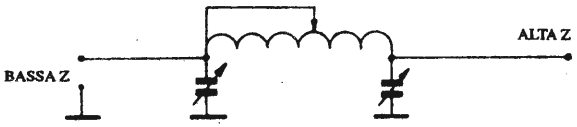


Fig. 16.- Accoppiatore da bassa ad alta impedenza.

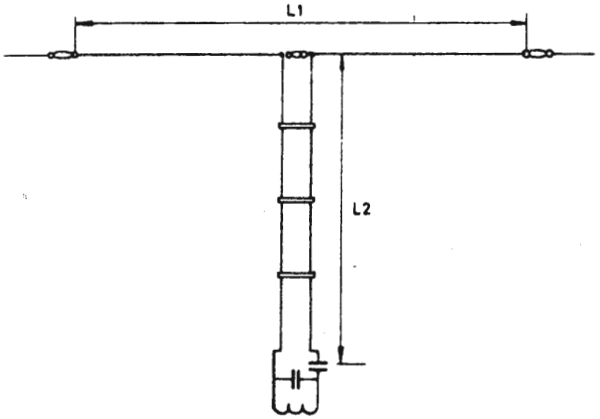


Fig. 17.- Antenna a filo lungo alimentata nel centro.

N = numero di mezze lunghezze d'onda
f = frequenza in MHz

Questa antenna viene utilizzata nel campo CB poiché irradia molti lobi nei piani orizzontale e verticale, cosa che permette di utilizzare l'angolo di irradiazione adeguato in ciascun momento della trasmissione.

Però, man mano che si allunga, l'irradiazione si fa sempre più direttiva nel verso di orientamento dell'antenna; nel caso questa terminasse con la sua impedenza caratteristica, il diagramma di irradiazione con due lobi a forma di otto che ha l'antenna aperta, si riduce a uno con un solo lobo di irradiazione verso la parte frontale, che fornisce un maggior guadagno.

L'alimentazione di una antenna di questo tipo, deve essere fatta ad un estremo o a un massimo di tensione, non potendosi connettere la discesa a un massimo di corrente.

La resistenza di irradiazione di questa antenna va dai 75 Ω per l'onda media, ai 170 Ω per antenne con più di 12 lunghezze d'onda.

Quando la lunghezza di una antenna a filo lungo supera le tre lunghezze d'onda, può essere connessa, ad un estremo, ad un alimentatore unifilare, poiché la lunghezza dell'antenna è notevolmente maggiore di quella rappresentata da questa discesa.

Una delle antenne che può essere utilizzata per tutte le bande HF è l'antenna di Hertz, che deve essere unita per un estremo al trasmettitore; ha una lunghezza di onda media per la frequenza più bassa che viene utilizzata, ed è

formata da un unico filo di circa 2 mm di diametro.

Per adattare l'impedenza dell'antenna al trasmettitore, bisogna intercalare un accoppiatore ad L, consistente in una bobina con presa intermedia e in un condensatore variabile collegato a massa, su ciascun estremo della bobina; variando L e C, è possibile ottenere un rapporto di onde stazionarie 1:1.

L'antenna di Hertz deve essere posizionata il più liberamente possibile, e quanta più parte di questa è disposta orizzontalmente meglio è.

Occorre installarla con una buona presa di terra nel trasmettitore, poiché viceversa, la corrente di antenna circolerebbe nel microfono, nella linea elettrica, ecc., causando delle reazioni e degli accoppiamenti nell'apparecchiatura, con possibili interferenze su apparecchi vicini alla stazione.

Una antenna di Hertz con una lunghezza di 41 metri si comporterà come una antenna per la banda di 80 metri, e per le altre bande come una antenna a filo lungo.

Avrà delle irradiazioni bidirezionali per i 21 e i 28 MHz, mentre per i 14 e 7 MHz il suo lobo di irradiazione orizzontale tende a formare un quadrifoglio.

L'antenna a filo lungo alimentata nel centro con una linea simmetrica, ha il vantaggio, rispetto a quella di Hertz, di non aver bisogno della presa di terra, essendo la parte orizzontale dell'antenna l'unica che irradia; richiede inoltre un buon accoppiatore per il suo corretto funzionamento.

Costruendo antenne con diverse dimensioni, e con la discesa e l'accoppiatore, si ottengono dei buoni risultati.

Alcune misure ottimali che permettono di lavorare nella V banda HF sono: 40 metri per la parte orizzontale e 20 metri per la linea, che sarà di 300 Ω con isolamento in aria, poiché se si tratta di un dielettrico solido le onde stazionarie che circolano in questo potrebbero causare dei problemi di isolamen-

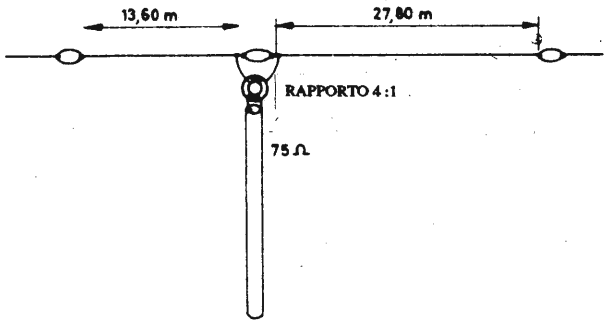


Fig. 18.- Antenna Windom per 80, 40, 20 e 10 metri.

to nel punto in cui si sommano i massimi di corrente e di tensione.

Antenna Windom

Si tratta di una antenna che può funzionare in bande sub- multiple (80, 40, 20 e 10 metri), con discesa sintonizzata, e con impedenza che dipende dal punto in cui questa è connessa con l'antenna. Avrà la stessa impedenza in tutte le bande.

Per discese a 300 Ω, la distanza del punto di connessione dal centro è di 6,7 metri; la lunghezza dell'antenna è di 40,8 metri, mentre la discesa può essere di 20,1 o 40,5 metri.

L'antenna a V capovolta

Può essere considerata come una antenna a filo lungo, alimentata nel centro, con gli estremi rivolti verso il basso. I suoi due lati sono uguali e di lunghezza, che deve essere un multiplo dispari del quarto di onda.

Lavora bene a partire da un angolo di 90° tra i suoi lati, e la sua alimentazione viene eseguita con una linea coassiale a 50 Ω. La sua polarizzazione è verticale.

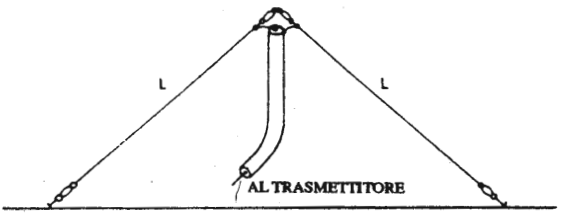


Fig. 19.- Antenna V invertita. L = multiplo dispari di quarti di lunghezza d'onda.

L'antenna a V

Due antenne a filo lungo, disposte a V orizzontale, costituiscono questo tipo di antenna, e dall'angolo che formano i suoi rami, si può ottenere che i lobi di irradiazione di una o dell'altra si sommino sulla sua bisettrice, con un guadagno maggiore rispetto ad una antenna a filo lungo propriamente detta.

Per una antenna di questo tipo, con una lunghezza di ciascun ramo equivalente a una lunghezza d'onda, l'angolo ottimale per avere il guadagno massimo è di 90°, e se i lati tendono ad allungarsi, questo angolo decresce.

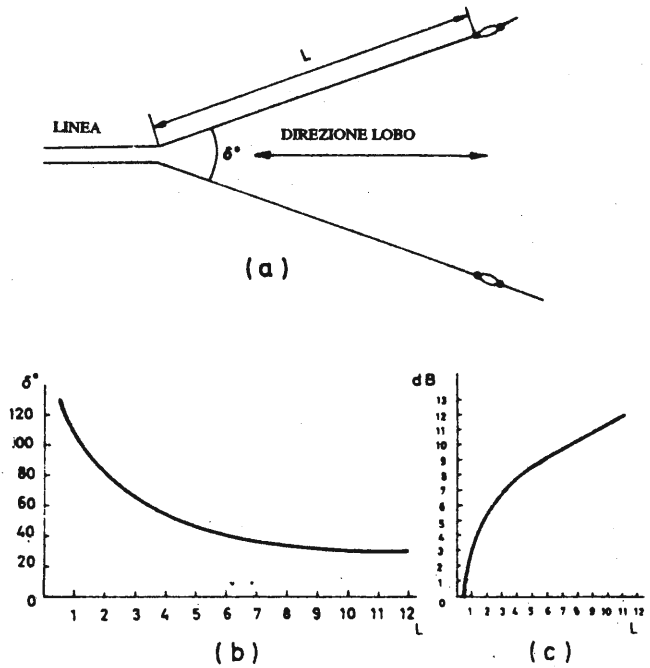


Fig. 20.- a) Antenna a V, vista dall'alto. b) Angolo formato dai lati di una antenna a V in funzione della loro lunghezza, espressa in numero di lunghezze d'onda complete. c) Guadagno dell'antenna a V in funzione della lunghezza dei suoi lati, espresso in lunghezze d'onda.

In questo modo, per una distanza di 10 lunghezze d'onda, l'angolo ottimale è approssimativamente di 37°.

Questa antenna, alimentata in un ventre di corrente, ha una impedenza vicina ai 200 Ω, che permette, utilizzando un adattatore con rapporto 4:1, la

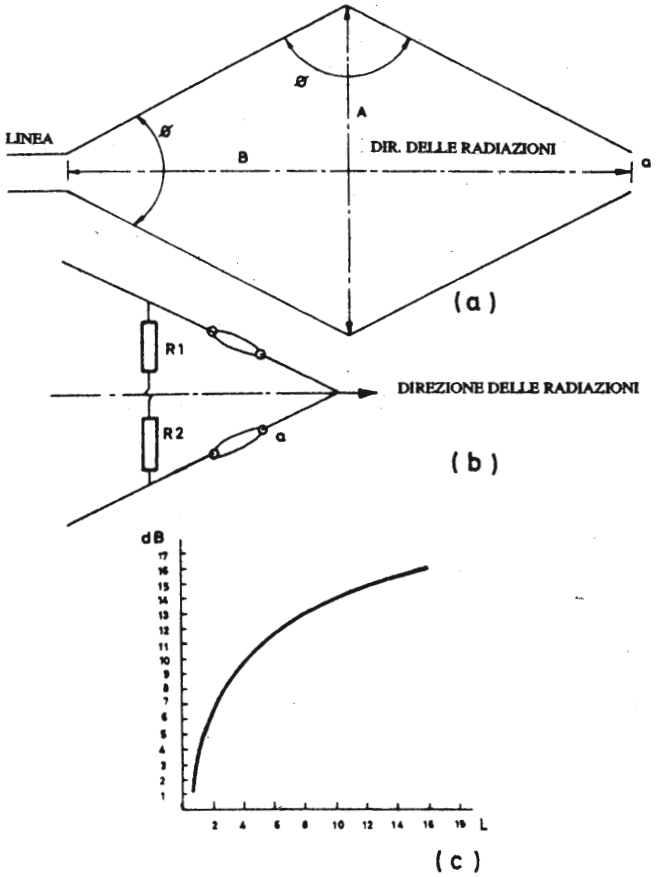


Fig. 21.- L'antenna romboidale aperta irradia nella direzione dell'asse maggiore. Con chiusura R1 + R2 ≈ 800 Ω, irradia in una sola direzione. b) Chiusura con una resistenza. c) Guadagno di una antenna romboidale in funzione della lunghezza di ciascuno dei suoi rami, in lunghezze d'onda.

sua alimentazione con un cavo coassiale di 52 Ω.

L'antenna romboidale

Come il suo stesso nome indica, l'antenna di cui ci occupiamo ha la forma di un rombo, è bidirezionale, e il suo guadagno equivale a quello di una antenna a V della stessa lunghezza.

Se invece di avere l'estremo opposto alla discesa in circuito aperto, lo si chiude con una resistenza non induttiva, di valore ohmico simile a quello della resistenza di ingresso (circa 800 Ω), si otterrà una antenna unidirezionale con un elevato guadagno, che irradia onde polarizzate orizzontalmente, con un basso angolo.

Nel progetto di una antenna romboidale, la presenza del terreno ha una grossa influenza sulla direttività, sulla lunghezza dei lati, sull'angolo tra i lati, e sull'angolo di irradiazione.

Ma a contrastare questo, esiste una grande tolleranza tra i parametri; per esempio, nel caso in cui i supporti non possano fornire l'altezza richiesta dall'antenna rispetto al terreno, se ne può aumentare la lunghezza, compensando in questo modo l'altro parametro, e considerando che, per aumenti che siano metà di quelli ottimali, l'aumento della lunghezza dei lati porterà ad avere un guadagno di antenna quasi pari a quello ottenuto con la miglior antenna installata.

La resistenza finale di una antenna romboidale, nel caso di trasmissione, dissipa dal 30 al 45% della potenza fornita dal trasmettitore all'antenna; pertanto questa, deve essere in grado di dissipare detta potenza senza deteriorarsi.

Si possono utilizzare delle resistenze al carbone non induttive, con alti valori di dissipazione; nel caso di grandi potenze, si utilizzano linee aperte a grande attenuazione, con impedenze da 600 a 700 Ω, potendosi lasciare queste linee aperte o chiuse su di una resistenza al carbone di minore dissipazione.

L'alimentazione di una antenna romboidale può essere effettuata tramite l'utilizzo di linee a 600 Ω, o per mezzo di un trasformatore di impedenza con cavo di tipo coassiale. Il guadagno di questa antenna viene determinato dalla lunghezza dei suoi lati.

CAPITOLO 5

ANTENNE VERTICALI E ANTENNE CON ELEMENTI PARASSITI

In questo secondo blocco di antenne emittenti e riceventi, verranno analizzate tutte le possibili *antenne verticali*, e verrà ampliato sensibilmente il tema relativo alle antenne dotate di *elementi parassiti*, di cui sono stati già anticipati alcuni particolari nel capitolo precedente.

Antenna verticale di tipo Marconi

Esiste una antenna verticale molto utilizzata per ottenere un angolo di irradiazione basso, che viene denominata *antenna Marconi*, la cui lunghezza è un quarto della lunghezza d'onda ($\lambda/4$).

Questa antenna deve essere installata in spazi liberi, senza oggetti metallici nelle vicinanze, e con una efficace presa di terra; in alcuni casi, si ottengono dei risultati soddisfacenti effettuando un collegamento con l'impianto di tubazione dell'acqua, anche se è sempre consigliabile una presa di terra indipendente con pochi ohm di resistenza.

Normalmente questa antenna è completamente isolata dal terreno, essendo la sua resistenza di irradiazione, nei casi più frequenti di alimentazione, la metà di quella del dipolo, ossia circa 37 Ω.

Come con i dipoli, possono essere costruite con più conduttori, ottenendo così un aumento dell'impedenza. Per esempio, con due conduttori cortocircuitati tra di loro sugli estremi opposti al terreno, e con uno di questi collegato a terra sull'altro estremo, si ottiene una antenna Marconi a due conduttori, tale che tra l'estremo libero e terra si ottiene una resistenza (o impedenza) di 150 ohm.

Se questo stesso quarto di onda viene costruito con tre conduttori, anch'essi cortocircuitati ad un estremo, e con due altri estremi collegati a terra, si ottiene un'antenna Marconi a tre conduttori, nella quale l'impedenza tra l'estremo libero e la terra è di 300 ohm.

Questa caratteristica risulta importante poiché, grazie ai valori dell'impedenza dell'antenna, è possibile alimentarla con linee di quel valore.

Adattamento gamma in una antenna di un quarto di onda

Sfruttando metodologie di adattamento simili a quelle utilizzate nei dipoli, è possibile ottenere un'antenna a un quarto di onda unifilare connessa a terra che, per mezzo dell'*adattamento gamma*, può essere collegata ad una linea coassiale da 75 ohm.

Ovviamente, trattandosi di antenne *non bilanciate*, quando si utilizzano linee di alimentazione coassiali non sono necessari adattatori, per il passaggio dallo stato equilibrato a quello squilibrato, come nel caso dei dipoli.

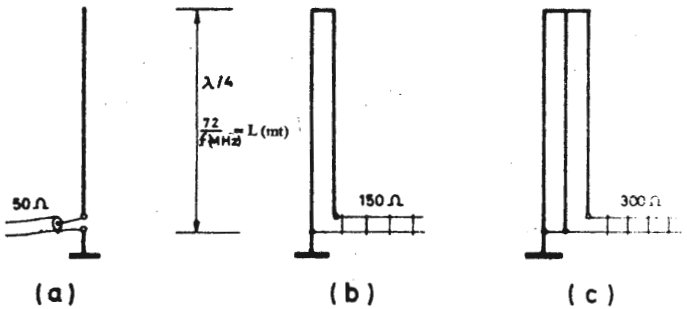


Fig. 1.- Antenne verticali a un quarto di onda: a) antenna Marconi; b) antenna Marconi a due conduttori; c) antenna Marconi a tre conduttori.

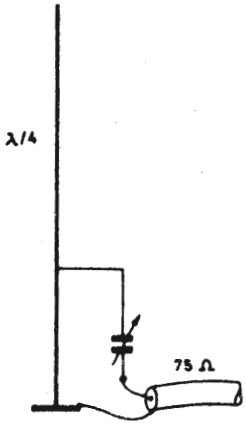


Fig. 2.- Adattamento gamma in una antenna a un quarto di onda.

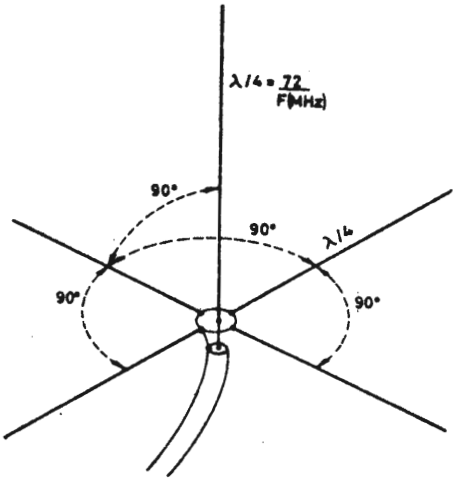


Fig. 3.- Antenna a un quarto di onda con piano di terra artificiale.

Antenna λ/4 con piano di terra artificiale

Molte volte, il maggior problema che possono presentare le antenne verticali è quello di avere una buona presa di terra. Questa è la ragione per cui si è sviluppata una variante, che consiste nel creare un *piano di terra artificiale*, utilizzando almeno quattro conduttori disposti a raggi orizzontali (o raggiera orizzontale) alla base dell'antenna verticale ad un quarto di onda.

Questi raggi hanno la stessa lunghezza dell'antenna e, il dispositivo, oltre a non richiedere la presa di terra, ha l'importante vantaggio di irradiare con un angolo verticale molto basso, indipendentemente dalla sua altezza rispetto al terreno, fatto che la rende particolarmente adatta per i sistemi CB dei radioamatori.

Il suo lobo di irradiazione orizzontale è *omnidirezionale*, come nelle antenne che presentano la presa di terra.

La resistenza di irradiazione dell'antenna con piano di terra, è di circa 30 Ω, e varia leggermente in funzione del rapporto lunghezza/diametro del conduttore utilizzato per la sua realizzazione.

Per alimentarla con una linea a 50 Ω, si può inclinare il piano di terra di circa 45° orizzontalmente, ottenendo un aumento della resistenza di irradiazione nell'antenna, e un suo adattamento corretto.

Sfruttando la proprietà della trasformazione di impedenze in una linea a un quarto di onda, è possibile alimentarla con un cavo coassiale da 75 Ω, in-

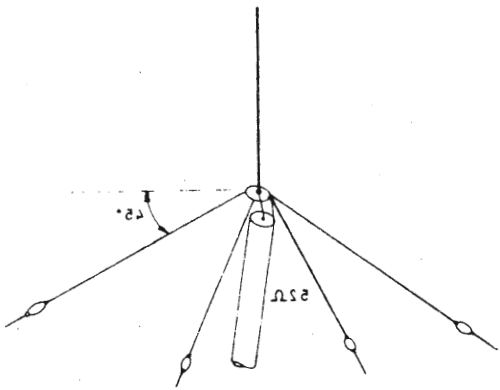


Fig.4.- Adattamento a 52 Ω per l'inclinazione dei raggi.

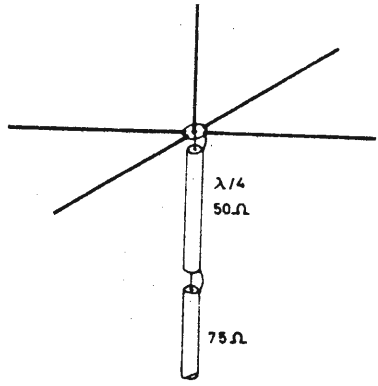


Fig. 5.- Adattamento a 75 Ω tramite una linea a un quarto di onda, realizzata con cavo coassiale da 50 Ω.

terponendo, tra questa linea e l'antenna, un quarto di onda di cavo coassiale da 50 Ω.

In questa antenna si possono inoltre inserire delle trappole, in modo che, con determinate lunghezze, sia possibile ottenerne la risonanza a diverse frequenze.

Antenna verticale elicoidale

E' anche possibile ottenere una antenna corta, avvolgendo *elicoidalmente* su di un nucleo isolante (tanto più grande sarà il suo diametro, tanto migliore sarà il suo rendimento) alcune spire di filo di ferro, per una lunghezza di mezza onda.

Questo sistema, permette una distribuzione della tensione e della corrente più lineare, rispetto ad una antenna a un quarto di onda accorciata tramite una bobina sulla base, ottenendo quindi un miglior rendimento.

Avvolgendo un conduttore di onda media, può darsi che l'antenna risulti un po' corta; allora può essere allungata aggiungendo un induttore con prese in serie a questa sulla base, o tramite un nucleo posto sulla punta.

Questa antenna ha una banda stretta e, pertanto, è sensibile alla frequenza.

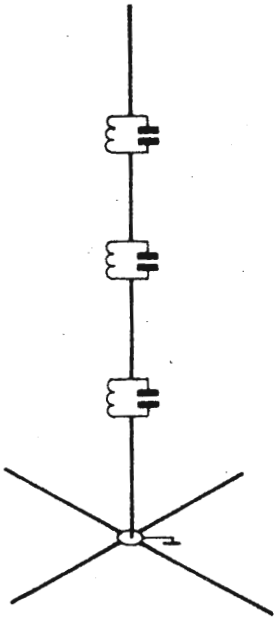


Fig. 6.- Disposizione delle trappole in una antenna verticale multibanda.

Per limitare le antenne verticali a un quarto di onda, si possono inserire delle bobine di carico sugli estremi inferiori o al centro; questo provoca una bassa resistenza di irradiazione e una reattanza alta, che obbligano l'utilizzo di reti con alto coefficiente Q, per compensare la reattanza e portare la resistenza a valori utili.

Per questo motivo, le antenne di questo tipo sono utilizzabili in un campo di funzionamento molto ristretto, prossimo alla frequenza di progetto, in apparecchiature mobili, e dove non è possibile installare un altro tipo di antenna.

Hanno un buon rendimento, a patto che l'energia venga applicata all'antenna in modo efficace.

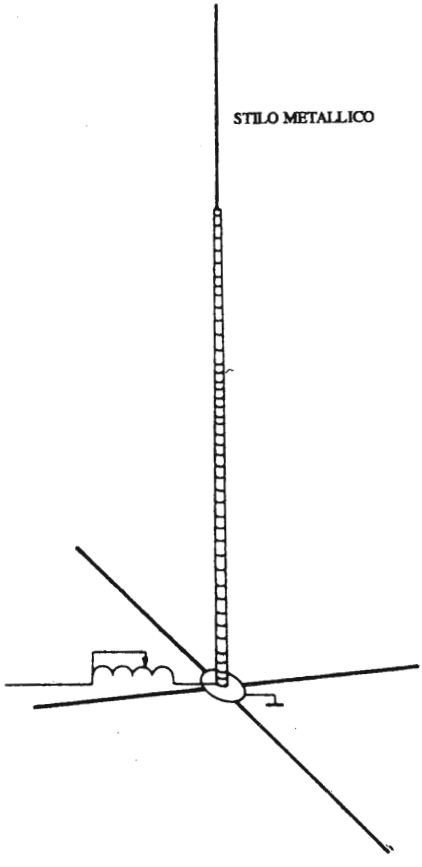


Fig. 7.- Antenna verticale elicoidale.

Antenne verticali multibanda

E' possibile costruire un tipo di *antenna multibanda* a un quarto di onda, unendo sulla parte inferiore diverse antenne, che risuonino a differenti frequenze di lavoro, e alimentandole con un cavo coassiale.

I raggi per questa antenna saranno quattro, a un quarto di onda per ciascuna frequenza di lavoro, isolati da terra.

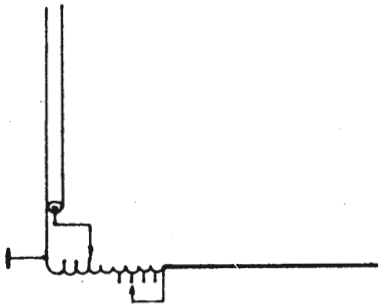


Fig. 8.- Antenna multibanda con carico sulla base.

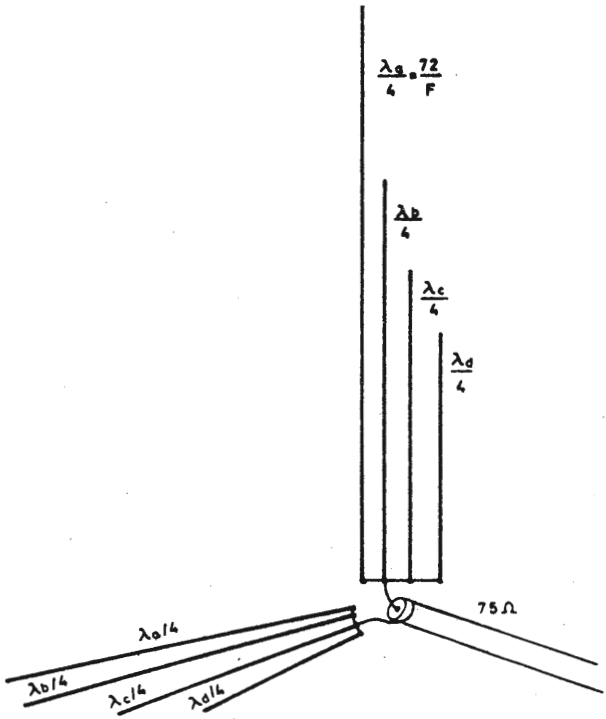


Fig. 9.- Antenna multibanda con piano di terra artificiale.

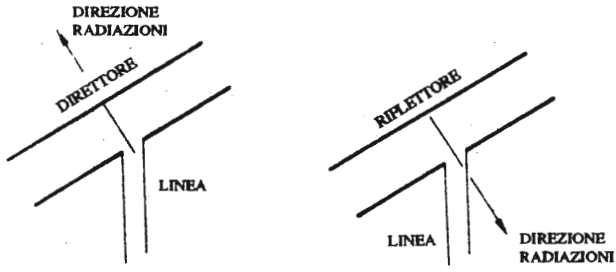


Fig. 10.- Direzione dell' irradiazione in funzione della forma dell' elemento parassita.

Nel caso di antenne con piano di terra, i raggi sono fili risonanti e, pertanto, devono essere isolati dal terreno, poiché in caso contrario perderebbero la loro risonanza.

Per questo fatto, gli estremi di questa antenna sono sotto tensione, e quindi occorre evitare qualunque tipo di contatto accidentale.

Antenne con elementi parassiti

Le antenne più note in determinate applicazioni - soprattutto tra i radioamatori che vogliono migliorare il rendimento delle loro stazioni - è senza dubbio l'antenna a *elementi parassiti* o *antenna Yagi*, della quale abbiamo già fornito alcune caratteristiche nei capitoli precedenti.

Questa antenna, che fu inventata nel 1926 dal Professor Hidetsugu Yagi dell'Università di Tokio, presenta diverse caratteristiche interessanti, che verranno descritte in questo capitolo.

Partendo dall'antenna a dipolo a mezza onda, è possibile ottenere antenne che irradiano o ricevono le onde elettromagnetiche in un fascio ristretto, e che permettono di concentrare in un solo punto tutta la potenza, ottenendo così che l'intensità di campo sia, in un punto, molto maggiore di quella che si otterrebbe con un'altra antenna della stessa potenza.

Posizionando un elemento di mezza lunghezza d'onda alla distanza di un quarto di onda da un dipolo eccitato, l'onda irradiata dal dipolo arriva a questo elemento sfasata di un tempo uguale ad un quarto di periodo dell'onda, producendo in questo una corrente indotta; questa corrente ha un verso tale che il campo indotto si oppone al campo induttore, creando in questo modo

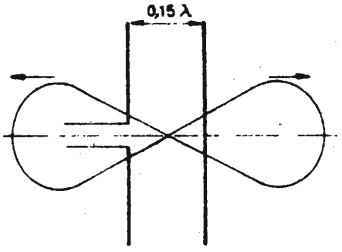


Fig. 11.- Lobi di irradiazione orizzontale di una antenna con un elemento parassita posto a 0,15 λ dal dipolo.

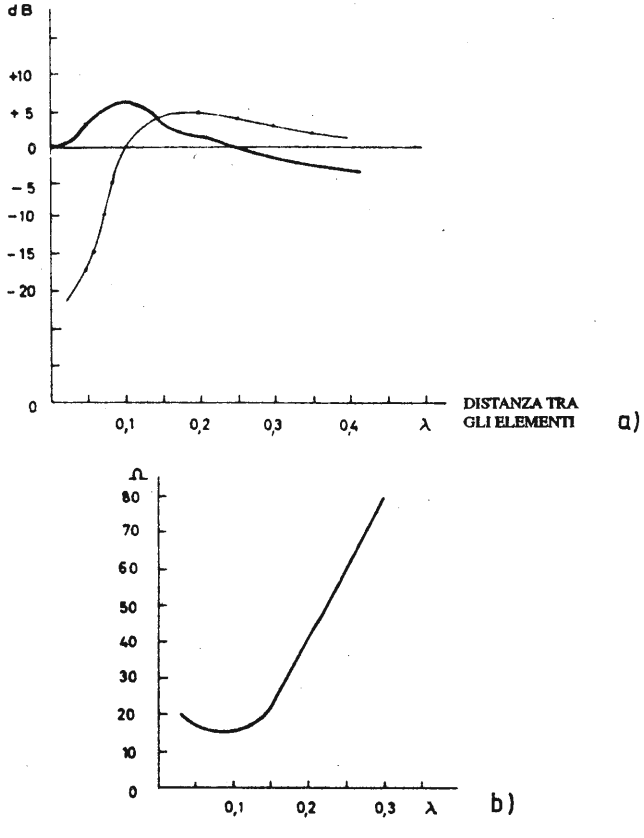


Fig. 12.- Influenza dell'elemento parassita: a) guadagno dell'antenna in funzione della separazione dell'elemento parassita dal dipolo; b) resistenza di irradiazione di una antenna a due elementi, in funzione della separazione tra questi.

uno sfasamento di un semiperiodo.

Ritornando al dipolo, questo campo si sfasa nuovamente di un quarto di periodo; se si sommano tutti gli sfasamenti avvenuti, si nota che l'onda torna al dipolo in fase con l'onda che circola in esso, sommandosi.

All'elemento che si è aggiunto occorre una certa energia per vibrare, che viene rubata da quella irradiata dal dipolo; per questo motivo viene definito *elemento parassita.*

Nel caso abbia una lunghezza maggiore rispetto al dipolo eccitato, si comporta come elemento riflettente, mentre nel caso fosse più corto agisce come elemento direttore.

In una antenna di questo tipo viene definito *dipolo* l'elemento connesso alla linea di trasmissione.

La lunghezza del dipolo e degli altri elementi, viene determinata tramite la solita equazione per il calcolo del dipolo.

La variazione dell'elemento parassita causa, nel caso di un allungamento, una reattanza induttiva, mentre nel caso di accorciamento, una reattanza capacitiva.

Al variare della sua lunghezza rispetto al dipolo, si genera una variazione nello sfasamento dell'onda, che permette di ridurre la separazione tra il dipolo e l'elemento.

Se la lunghezza dell'elemento parassita è la stessa del dipolo, e esiste una separazione tra questi di 0,15 lunghezze d'onda, si ottengono due guadagni uguali, uno in avanti e uno indietro. Per una distanza maggiore, l'elemento parassita si comporta come riflettente, e per una distanza inferiore a 0,15 lunghezze d'onda agisce come direttore.

Un dipolo, in presenza di elementi parassiti, tende a diminuire la sua resistenza quando le distanze sono brevi. Per un elemento direttivo di 0,1 lunghezze d'onda, l'impedenza del dipolo risulta ridotta a 15 Ω, e aumenta con l'aumentare della separazione.

Antenna Yagi a due elementi

L'antenna più semplice con elementi parassiti, o *antenna Yagi*, è quella formata da un dipolo propriamente detto e da un elemento passivo. Quando quest'ultimo elemento ha la stessa lunghezza del dipolo, ci si trova nel caso che verrà analizzato più avanti, ma se la lunghezza dell'elemento passivo aumenta del 5%, o più, questo comincia a funzionare come riflettore, portando ad una diminuzione del lobo di irradiazione anteriore, e ad un aumento di quello posteriore, con un guadagno in questa direzione di circa 6 dB.

Se, viceversa, si diminuisce la lunghezza originaria dell'elemento passi-

vo del 5%, detto elemento comincerà a funzionare come direttore, causando lo stesso lobo di irradiazione del caso precedente, ma invertito.

Normalmente, per il calcolo di questi elementi di antenna, si utilizzano le seguenti espressioni:

$$\text{Dipolo} = \frac{143}{f(\text{MHz})}; \quad \text{Riflettore} = \frac{148}{f(\text{MHz})}; \quad \text{Direttore} = \frac{138}{f(\text{MHz})}$$

Per ciascun spaziamento bisogna determinare la misura ottimale dell'elemento passivo, e può essere necessario aumentare o diminuire del 3 o 5% il riflettore o il direttore, in funzione della loro separazione rispetto al dipolo.

Essendo l'elemento passivo vicino al dipolo, si produce su di questo una sintonia verso una frequenza più alta di quella calcolata, per cui si renderà ne-

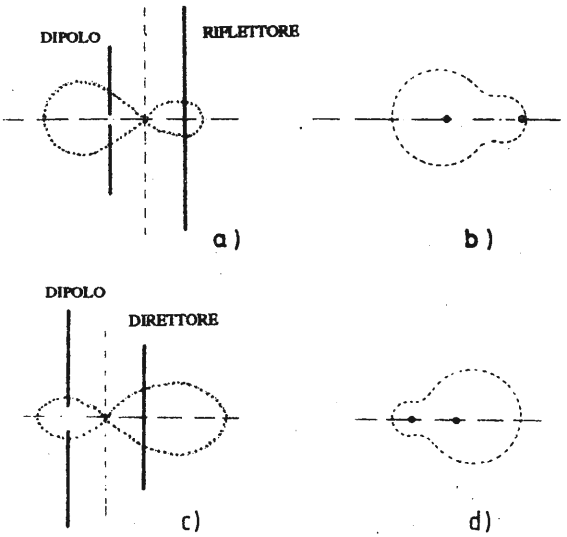


Fig. 13.- Diagrammi di irradiazione di una antenna Yagi a due elementi: a) e b) diagrammi nei piani orizzontale e verticale, rispettivamente, quando la lunghezza dell'elemento parassita (riflettore) aumenta del 5%; c) e d) diagrammi nei piani orizzontale e verticale, rispettivamente, quando la lunghezza dell'elemento parassita (direttore) diminuisce del 5%.

cessario un allungamento.

Il guadagno di una antenna a due elementi rispetto al dipolo, è rappresentato in Fig. 14; il massimo guadagno si ottiene quando l'elemento passivo agisce come direttore, e si trova posizionato a 0,15 lunghezze d'onda dal dipolo.

In alcuni casi, anziché la massima radiazione anteriore, quello che interessa è sfruttare le proprietà di queste antenne, e avere l'altro massimo che influenza il rapporto antero-posteriore.

Per evitare le interferenze che possono comparire posteriormente all'an-

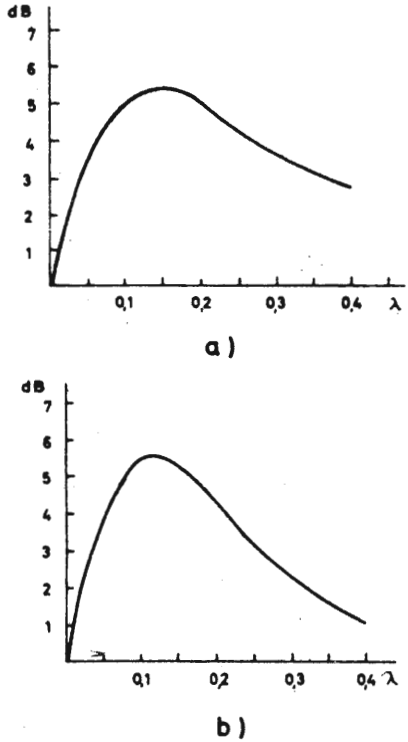


Fig. 14.- Guadagni di una antenna a due elementi: a) con dipolo riflettente, in funzione della separazione; b) con dipolo direttivo, anche in funzione della separazione tra i due elementi.

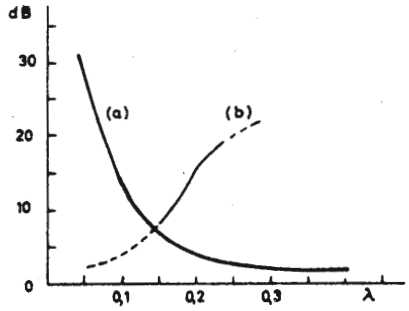


Fig. 15.- Grafici del rapporto anteriore/posteriore di una antenna a due elementi: a) con elemento direttivo; b) con elemento riflettente.

tenna, occorre far sì che il lobo posteriore sia il più piccolo possibile, e si ottiene variando la separazione del riflettore o del direttore dal dipolo, o meglio, aumentando o diminuendo la lunghezza di tali elementi.

La *larghezza di banda* dell'antenna aumenta quando il fattore Q della stessa diminuisce, la qual cosa può essere ottenuta progettando gli elementi con dimensioni sufficientemente grandi; per la banda HF, per esempio, una relazione lunghezza/diametro che va da 300 a 400, fornisce una larghezza di banda sufficiente per poter lavorare entro il margine di frequenze della banda supposta.

Inoltre, come si sa, la separazione tra gli elementi influisce sul fattore Q

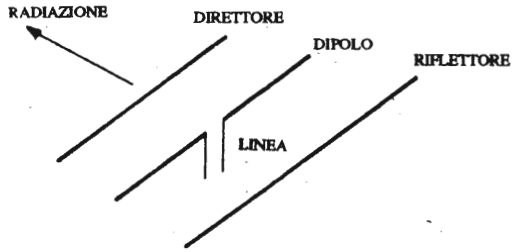


Fig. 16.- Antenna direzionale a tre elementi.

dell'antenna e, pertanto, sulla sua larghezza di banda, permettendo ampi margini di dimensionamento delle antenne citate, sia nella fase di trasmissione che in quella di ricezione.

Antenna Yagi a tre elementi

Se all'antenna a due elementi che si è appena vista, se ne aggiunge un terzo, si ottiene una antenna Yagi a tre elementi, che sarà costituita pertanto, da un riflettore, da un dipolo, e da un direttore.

Ovviamente, tutto quanto detto per gli elementi parassiti in una antenna a due elementi, risulta perfettamente valido per l'antenna in questione.

L'impedenza del dipolo si riduce alla metà di quella propria dell'antenna a due elementi, arrivando a valori di 10 Ω per separazioni da 0,13 a 0,20 lunghezze d'onda per il riflettore, e di 0,10 lunghezze d'onda per il direttore.

Queste misure sono riferite all'ipotesi di guadagno massimo, minor impedenza, e minima larghezza di banda.

Nel caso di una maggiore separazione dell'elemento riflettente, si avrà una maggior larghezza di banda, ed un aumento del guadagno d'antenna. Per esempio, per una separazione del riflettore di 0,25 lunghezze d'onda, l'impedenza dell'antenna risulterà di circa 30 Ω.

Questa antenna viene di solito dimensionata sufficientemente grande e, normalmente, si utilizza per le bande dei 10, 15, e 20 metri; per la altre bande (40 e 80 metri) si impiegano trappole interposte sugli elementi, per dar luogo alla loro risonanza.

Come nei dipoli semplici, anche in questo caso possiamo fare in modo che le trappole risuonino a diverse frequenze, interponendone diverse vicino ai dipoli riflettente e direttivo.

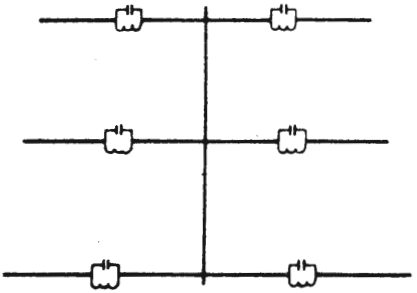


Fig. 17.- Antenna direzionale multibanda.

Le lunghezze degli elementi per separazioni di 0,5 e 0,5 lunghezze d'onda si calcolano nel seguente modo:

$$\text{Riflettore} = \frac{150}{f(\text{MHz})}; \quad \text{Dipolo} = \frac{143}{f(\text{MHz})}; \quad \text{Direttore} = \frac{138}{f(\text{MHz})}$$

Questa antenna avrà un guadagno di 7,5 dB, e una impedenza di 10 Ω.

Riducendo la lunghezza del direttore, e lasciando tra gli elementi una separazione di 0,25 e 0,25 lunghezze d'onda, si ottiene un guadagno di 8,5 dB, e un valore di impedenza di circa 35 Ω.

Antenne a più elementi

Quando occorre un maggior guadagno di antenna (tra i 9 e 10 dB), si può ricorrere all'aggiunta di un nuovo elemento direttivo all'antenna a tre elementi, la cui lunghezza deve essere da 130 a 150 diviso per la frequenza misurata in MHz.

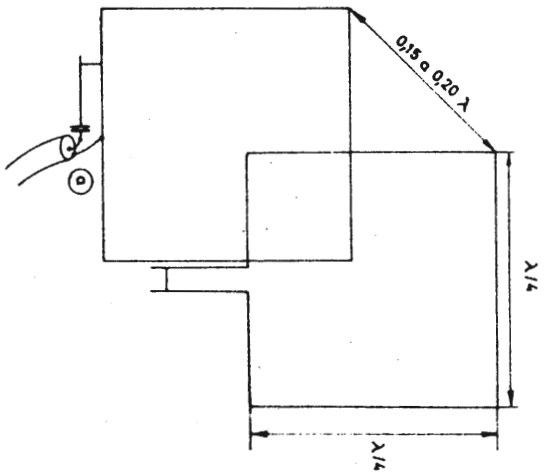


Fig. 18.- Antenna a telaio cubico

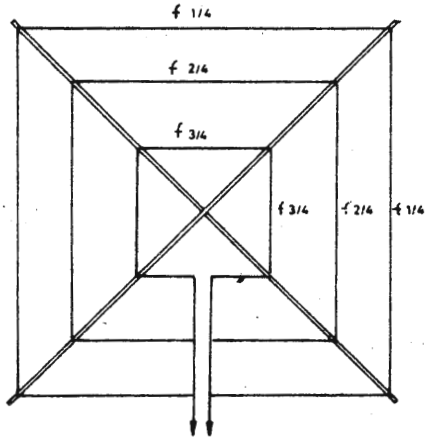


Fig. 19.- Antenna multibanda formata da vari telai che risuonano a diverse frequenze, collocati sullo stesso supporto.

Con l'aggiunta di questo nuovo elemento direttivo, l'impedenza dell'antenna risulta ridotta, ma sarà sempre possibile aumentare un po' la separazione tra gli elementi, perché l'influenza del nuovo direttore non sia responsabile dell'impedenza dell'antenna a cui viene applicato.

Antenna a telaio cubico

Una antenna attualmente molto conosciuta, è quella costituita da due telai quadrati formati con conduttori, i cui lati sono lunghi un quarto della lunghezza d'onda, sostenuti da un materiale isolante; questa antenna è normalmente conosciuta con il nome di *antenna a telaio cubico*.

Detta antenna, avendo ciascun lato del telaio quadrato lungo un quarto della lunghezza d'onda, risulta avere una lunghezza d'onda totale pari a un'onda completa per telaio.

Uno dei telai viene eccitato e l'altro agisce normalmente come riflettore. Nel caso sia richiesto un maggior guadagno, è possibile aggiungere uno o più elementi funzionanti come direttori.

L'equazione per calcolare la lunghezza del telaio eccitato è la seguente:

$$L = \frac{3.035}{f(MHz)}$$

Per il riflettore si utilizza l'espressione:

$$L = \frac{3.180}{f(MHz)}$$

che conferisce una maggior lunghezza.

Tramite un pezzo di linea aperta cortocircuitata, vengono regolate sperimentalmente, per ottenere il massimo guadagno anteriore.

La distanza tra i due telai può essere da 0,15 a 0,2 lunghezze d'onda. Se si utilizzano elementi direttivi, questi saranno del 5% più corti rispetto all'elemento eccitato.

Il principio di funzionamento di questo tipo di antenna è lo stesso delle antenne con elementi retti e parassiti; si possono disporre più telai che risuonino a diverse frequenze sullo stesso supporto, o trappole in parallelo, e con una sola discesa ottenere una buona antenna multibanda adatta per il CB, anche se viene installata vicino a terra, dove invece l'antenna Yagi non funzionerebbe.

A titolo di esempio, le distanze tra i telai e le misure corrispondenti (entrambe in centimetri) per le diverse bande, sono riportate nella tabella 1 seguente:

L'impedenza misurata al centro di un lato del telaio, è approssimativamente di 75 Ω, che ne permette l'alimentazione con un cavo coassiale di 75 Ω, per mezzo di un trasformatore con rapporto 1:1 da asimmetrico a simmetrico.

La separazione tra gli elementi può essere da 3 a 3,50 metri, e il guadagno di questa antenna può essere comparato con quello di una antenna Yagi a tre elementi

Per 20 m - 14 MHz; riflettore 4 x 555; elemento eccitato 4 x 524
Per 15 m - 21 MHz; riflettore 4 x 377; elemento eccitato 4 x 356
Per 10 m - 28 MHz; riflettore 4 x 280; elemento eccitato 4 x 262

Tabella 1.- Caratteristiche dei telai di una antenna multibanda per le bande di 20, 15, e 10 m.

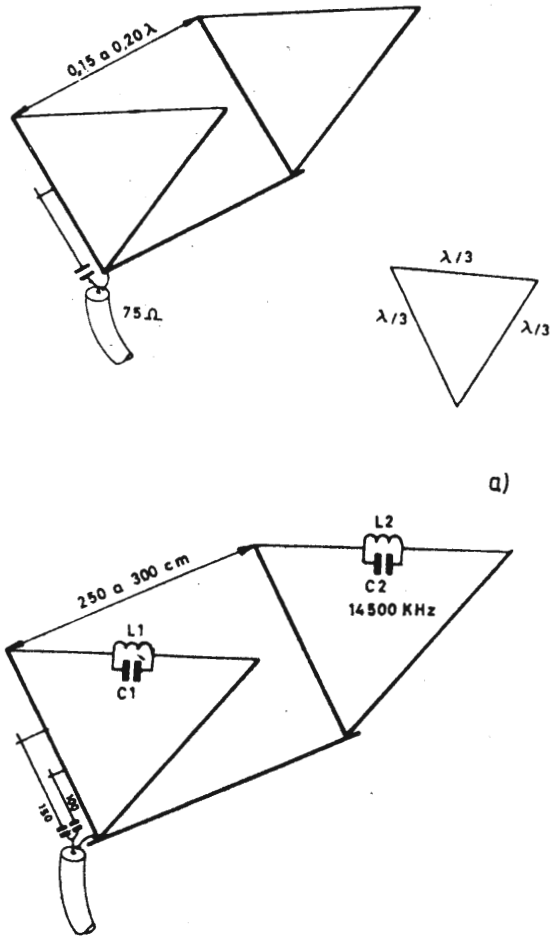


Fig. 20.- Antenna Delta: a) con due elementi; b) applicazione per 14 e 25 MHz.

Antenna Delta

Un'altra forma di antenna con elementi parassiti è l'*antenna Delta*, nella quale, come in quella a telaio, gli elementi hanno una lunghezza d'onda com-

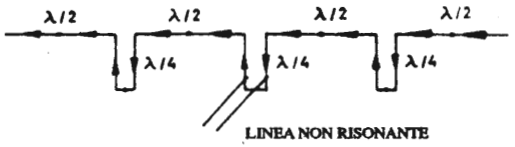


Fig. 21.- Antenna lineare a quattro elementi con le loro corrispondenti linee risonanti a λ/4.

pleta, e sono disposti in forma di triangolo equilatero.

I principali vantaggi di questa antenna, sono quello di poter essere realizzata completamente in metallo, di aver bisogno di pochissime regolazioni, e di avere una maggior larghezza di banda rispetto a quella a telaio.

L'alimentazione di questa antenna si ottiene con un cavo coassiale da 75 Ω con un adattamento gamma, che permette di mantenere un ROS al di sotto di 1,5:1 per tutta la banda.

L'equazione per calcolare la lunghezza del riflettore è:

$$L = \frac{3.210}{f(MHz)}$$

e quella per l'elemento eccitato:

$$L = \frac{3.066}{f(MHz)}$$

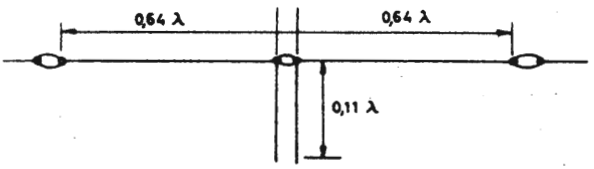


Fig. 22.- Antenna a doppio zepelin.

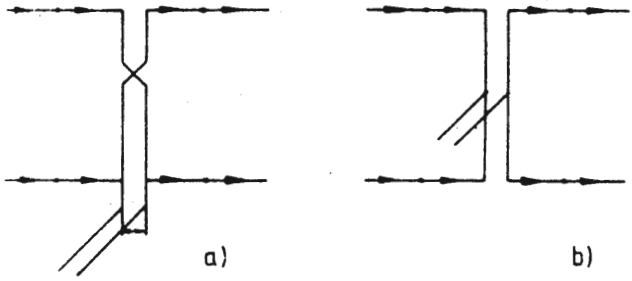


Fig. 23.- Antenna lineare con irradiazione trasversale Lazy H: a) alimentazione ad un estremo; b) alimentazione al centro.

La separazione tra gli elementi va da 0,15 a 0,2 lunghezze d'onda; il guadagno è compreso tra 7 e 8 dB.

Una antenna di questo tipo, che funziona nella banda dei 14 e 21 MHz, è illustrata in Fig. 20. La lunghezza totale del riflettore è di 1.600 cm, quella dell'elemento eccitato di 1.549 cm, e la separazione tra questi due va da 2,5 a 3 metri.

La trappola risuona a 15.000 KHz per l'elemento eccitato, ed è formata da L1=1,82 μH, C1=56 pF, mentre quella del riflettore si regola a 14.500 KHz con L2=1,82 μH e C2=62 pF; le prese dell'adattatore gamma sono rispettivamente a 140 e 100 cm dal vertice, e la capacità in serie va da 150 a 100 pF.

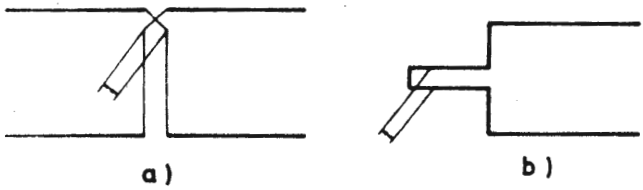


Fig. 24.- Antenna lineare con direttività longitudinale: a) alimentazione al centro; b) alimentazione agli estremi.

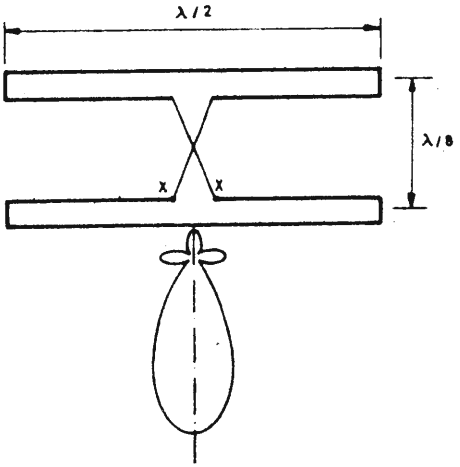


Fig. 25.- Antenna a due elementi con sfasamento tra questi e lobo di irradiazione nel piano orizzontale.

Antenna lineare

Una *antenna lineare* è costituita da due o più elementi radianti, lunghi mezza lunghezza d'onda ognuno, posti in modo tale che la corrente circoli in fase.

Per ottenere questa caratteristica, bisogna invertire la fase del segnale da un elemento all'altro, fatto che si ottiene tramite linee risonanti a un quarto di lunghezza d'onda, connesse in serie a ciascun elemento radiante.

Il diagramma di irradiazione verticale è, in tutti i casi, uguale a quello del dipolo, e il diagramma orizzontale risulta più acuto se l'antenna ha un guadagno maggiore, guadagno che è proporzionale al numero di semionde che appartengono all'antenna, in modo tale che per due semionde risulta di 1,8 dB, per 3 di 3,3 dB, per 6 di 6,6 dB, ecc.

Più le si aggiungono elementi in fase, più la resistenza aumenta, e viene ad essere il risultato di una moltiplicazione per 100 del numero di elementi a onda media.

Una variazione di questo tipo di antenna, è il *doppio zepelin*, che con due elementi permette di ottenere un maggior guadagno. Il suo progetto si basa sull'aumento della lunghezza degli elementi, in modo tale che questi risultino accorciati a 0,64 lunghezze d'onda, con la linea di adattamento a 0,11 lunghezze

d'onda. In questo modo si mantiene la risonanza.

Per ottenere il massimo rendimento di queste antenne, è consigliabile costruirle partendo dalle relazioni classiche, e sintonizzarle dopo averle installate.

Quando si sfasa l'alimentazione di 180°, si ha l'irradiazione nella direzione del piano che contiene i conduttori e che viene definito *longitudinale*.

Sono stati sviluppati diversi tipi di antenne lineari con irradiazione trasversale; una delle più conosciute è la *Lazy L*, che è costituita da due elementi lineari posizionati su altri due, e alimentati con una linea sfasata di 180°; questa rete può essere alimentata anche al centro.

Vi sono diverse combinazioni di antenne lineari. Ciascuna fornisce caratteristiche diverse di guadagno e di direttività, in base al numero di elementi da cui è composta.

Il caso più semplice di antenna lineare con direttività longitudinale, si ottiene con due dipoli posti sul piano orizzontale e uniti tramite una linea che provoca tra i due uno sfasamento di 180°. La separazione tra i dipoli è compresa tra 0,11 e 0,25 lunghezze d'onda.

A partire da questa, si possono aggiungere le sezioni che si desiderano per ottenere una maggiore direttività, o un maggior guadagno.

L'alimentazione di questi gruppi si ottiene tramite una sezione di adattamento a un quarto di onda in cortocircuito.

Una antenna molto usata negli anni sessanta fu quella formata da due dipoli piegati, separarti di 1/8 di onda, e uniti da una linea con trasposizione, per introdurre uno sfasamento di 180° tra di loro.

Se si considerano i 180° che produce la linea, e i 45° che si ottengono separando i dipoli di 1/8 della lunghezza d'onda, si ottiene un totale di 135°, che provoca un lobo di irradiazione orizzontale con 5 dB di guadagno rispetto al dipolo semplice, e con un rapporto anteriore-posteriore di circa 20dB; l'impedenza è di circa 87 Ω, che ne permette l'alimentazione con una linea da 75 Ω.

CAPITOLO 6

ANTENNE PER ALTE E ALTISSIME FREQUENZE

Nei capitoli precedenti si sono visti i principi di funzionamento fondamentali di una vasta gamma di antenne emittenti e riceventi, con le loro caratteristiche costruttive e di altra specie.

Tra le possibilità di raggruppamento che abbiamo citato in precedenza, forse resta da segnalare quella che riguarda tutte quelle antenne che hanno il loro campo di applicazione nelle frequenze alte e molto alte, anche se questo tipo di raggruppamento non è molto ortodosso. Tuttavia, si è deciso di adottarlo ugualmente, nel convincimento che può risultare molto utile per il lettore, sempre se si stabilisce una debita corrispondenza con quanto esposto nei capitoli precedenti.

Come il lettore già sa, la regione delle frequenze molto alte comincia verso i 30 MHz, e arriva finò ai 300 MHz. Quella corrispondente alle frequenze ultra alte si pone tra i 1.300 MHz e i 3.000 MHz. Poiché le misure fisiche delle antenne sono inversamente proporzionali alla frequenza, è possibile realizzare un nuovo studio di queste finalizzandolo, all'interno delle bande citate, a delle dimensioni realizzabili, cosa che nelle altre gamme di frequenza risulta difficile da ottenere e costruire meccanicamente.

D'altra parte, molti dei modelli di base delle antenne utilizzate in HF possono anche essere utilizzati per la VHF e per l'UHF, con le opportune modifiche, e per questo si dedicherà a questo studio il presente capitolo.

Aspetti generali

Sono molti i radioamatori che si costruiscono le loro antenne per operare in queste gamme di frequenza.

Altri invece le acquistano, ma tutti convengono su di un punto: che in

nessuno dei due casi hanno a loro disposizione una antenna ottimale che permetta loro di lavorare sulle diverse modulazioni che queste frequenze consentono, e che non è possibile conseguire contemporaneamente in una sola antenna un elevato guadagno, una bassa direttività, la polarizzazione nei due sensi, una buona larghezza di banda, ecc. , perché ciascun modello di antenna soddisfa solo alcune di queste caratteristiche a scapito delle altre.

E' nello spirito del radioamatore compilare sempre una lista delle caratteristiche prioritarie che richiede a una antenna, per trovare tra le diverse a disposizione in commercio quella che maggiormente lo soddisfa.

Nel progettare l'antenna di cui si ha bisogno, bisogna considerare la grandezza della stessa; una antenna a 144 MHz capta il 66% di energia in più rispetto a qualsiasi antenna progettata per i 432 MHz, pur avendo entrambe lo stesso guadagno.

Pertanto, per ottenere lo stesso rendimento sui 432 MHz, occorrerà moltiplicare per tre il numero degli elementi che compongono una antenna per i 144 MHz.

In fase costruttiva è comunque sempre opportuno montare qualche elemento in più, per supplire agli altri effetti.

Il guadagno dell'antenna è rapportato al diagramma di irradiazione.

Quanto più concentrata è l'energia verso una determinata direzione, maggiore sarà il guadagno dell'antenna.

L'*antenna isotropica* irradia nello stesso modo in tutte le direzioni, ragione per cui un dipolo fornisce su di questa un guadagno di 2,1 dB; per ottenere valori di guadagno superiori rispetto al dipolo, possono essere utilizzate antenne di tipo lineare, Yagi, ecc.

Al radioamatore che si dedica al CB in queste frequenze, interessa ottenere un alto guadagno, e un angolo di irradiazione basso, mentre se si desidera una antenna per realizzare il QSQ a breve distanza, è preferibile utilizzare una antenna omnidirezionale, malgrado si ricevano maggiori disturbi e interferenze.

E' inoltre molto interessante per il radioamatore, conoscere la larghezza di banda dell'antenna, poiché per alcuni sono sufficienti pochi KHertz, mentre altri desiderano spaziare su tutta la banda; nella banda dei 2 metri sono 2 MHz, ma nella banda dei 70 cm risultano 10 MHz, e risulta realmente difficile ottenere una antenna con una risposta piana per tutta la banda.

La lunghezza fisica del dipolo per queste frequenze risulta decisamente ridotta, in quanto è possibile aumentare il suo diametro per ottenere caratteristiche di banda larga.

Anche l'altezza rispetto al terreno influisce sul rendimento di una antenna, ma se si ha a disposizione uno spazio libero, è sufficiente una minima altezza; viceversa, bisognerebbe ricorrere a differenze notevoli di altezza per

ottenere un effetto apprezzabile.

Un'altro fattore molto importante è la polarizzazione; attualmente questo concetto è stato sufficientemente ben definito per le diverse applicazioni all'interno di questa banda, ed è consigliabile seguire dette indicazioni, poiché se si opera con un corrispondente che utilizza un diverso tipo di polarizzazione, si può avere una perdita di 21 o più dB.

La parte inferiore del primo MHertz della banda dei due metri, viene utilizzato per il CB, normalmente con polarizzazione orizzontale, per via della maggior facilità di installazione per grandi gruppi di antenne di tipo Yagi; praticamente non si hanno vantaggi nell'utilizzare altri tipi di polarizzazione per comunicazioni a lunga distanza.

Viceversa, nel secondo MHertz (da 145 a 146 MHz), si utilizza prevalentemente la polarizzazione verticale, soprattutto per le automobili e i ripetitori, malgrado che per brevi tragitti si ottengano segnali migliori con la polarizzazione orizzontale, poiché con la polarizzazione verticale si ricevono più rumori e interferenze.

Nonostante ciò, le antenne con polarizzazione verticale sono più semplici per l'irradiazione omnidirezionale.

Un altro fattore a cui occorre prestare molta attenzione nell'installare antenne per questa banda, è la qualità della linea di trasmissione.

Anche se la linea aperta limita notevolmente le perdite, la sua realizzazione risulta molto complessa, per via del fatto che ha i conduttori molto grossi e poco separati tra di loro, per evitare l'irradiazione.

Inoltre, bisogna evitare di realizzare angoli molto bruschi, e porre la linea nelle vicinanze di oggetti metallici.

Molte volte i risultati che si ottengono compensano tutte queste attenzioni, poiché i valori di perdita che ne risultano sono molto piccoli, e equivalgono al miglior coassiale.

Per esempio, 30 metri di linea realizzata con rame di 2 mm di diametro, separata di circa 19 mm con un buon isolatore (teflon), presenta, alla frequenza di 144 MHz, delle perdite di 1 dB, e per i 432 MHz, di 1 o 2 dB.

Bisogna evitare di utilizzare cavi coassiali di piccolo diametro, come potrebbero essere i cavi RG58U o RG59U, tranne che per la realizzazione di linee molto brevi; cavi del tipo RG8 e RG11 possono essere utilizzati fino ai 15 o 20 metri, pur sapendo di subire delle perdite notevoli.

Attualmente, esistono cavi coassiali speciali, con isolamento semiaereo, che presentano in queste frequenze perdite molto basse per notevoli distanze.

Antenne Yagi per i 144 MHz

Sono molte le possibili combinazioni per ottenere una antenna di questo tipo; dal variarne il numero degli elementi, fino al modificarne la costituzione fisica, il suo adattamento alla linea, lo spaziamento tra gli elementi, le sue dimensioni, ecc.

Malgrado l'*antenna Yagi* abbia un numero inferiore di elementi (al massimo cinque), le equazioni classiche per il calcolo della loro lunghezza sono sufficienti per ottenere una antenna che forse non sarà quella ottimale, ma il cui risultato coinciderà con quello che si era calcolato.

A partire da questo numero di elementi, è molto difficile che una antenna progettata secondo certe relazioni determinate fornisca un rendimento ottimo, e, normalmente, si regolano sperimentalmente in base alle misurazioni effettuate per ciascun caso reale.

Antenna a tre elementi

Come si è visto nel capitolo precedente, l'antenna Yagi a tre elementi si progetta partendo dalle tre equazioni seguenti:

$$\textit{Lunghezza:}\ \text{Riflettore} = \frac{150}{f};\ \text{Dipolo} = \frac{143}{f};\ \text{Direttore} = \frac{138}{f}$$

Come nel caso delle frequenze normali, è necessario fissare la separa-

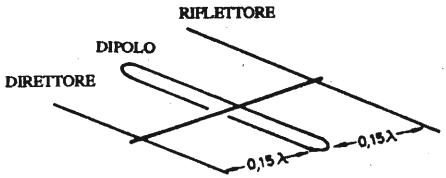


Fig. 1.- Antenna Yagi a tre elementi.

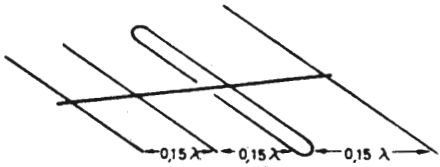


Fig. 2.- Antenna Yagi a quattro elementi.

zione tra gli elementi, che risulta essere, nel caso da noi preso in esame, di 0,15 volte la lunghezza d'onda.

Antenna a quattro elementi

In questo caso, le equazioni che definiscono le rispettive lunghezze in funzione della frequenza, sono quelle che si riportano di seguito:

Lunghezze:

$$\text{Riflettore} = \frac{150}{f}\ ;\ \text{Dipolo} = \frac{143}{f}\ ;\ 1^{o}\ \text{Direttore} = \frac{138}{f}\ ;\ 2^{o}\ \text{Direttore} = \frac{134}{f}$$

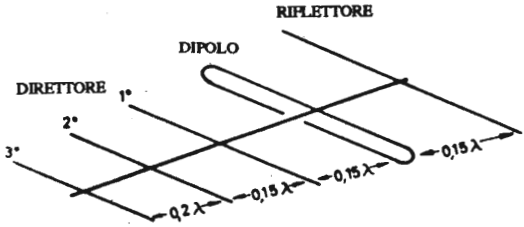


Fig. 3.- Antenna Yagi a cinque elementi.

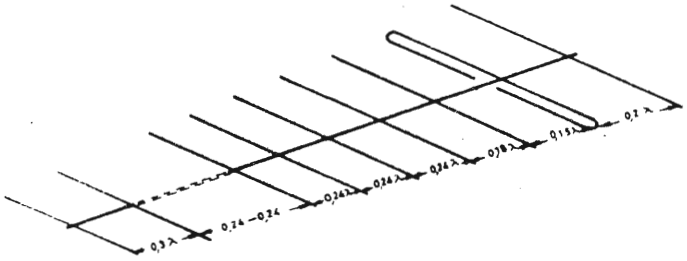


Fig. 4.- Antenna Yagi da 10 a 20 elementi.

Per quello che riguarda la separazione tra gli elementi che costituiscono l'antenna, risulta essere di 0,15 volte la lunghezza d'onda per ciascuno di loro.

Antenna a cinque o più elementi

Se alle antenne a quattro elementi si aggiunge un terzo elemento direttivo, la cui lunghezza risulti pari a 120/f, separato dal secondo direttore di 0,2 volte la lunghezza d'onda, e si riduce la lunghezza di questo secondo elemen-

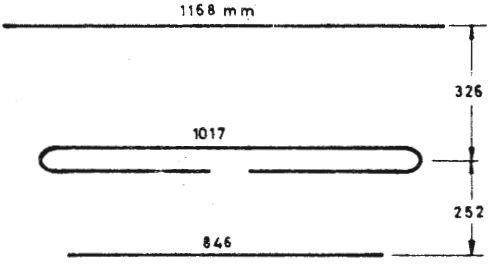


Fig. 5.- Dimensioni di una antenna Yagi a tre elementi.

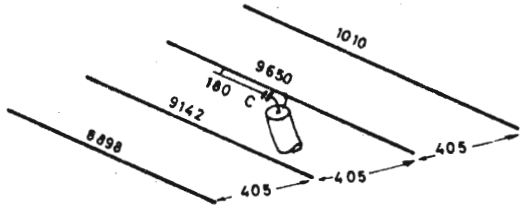


Fig. 6.- Antenna Yagi a quattro elementi con adattamento gamma per una linea coassiale da 75 Ω. Il condensatore variabile ha una capacità da 3 a 50 pF.

to a 130/f, si ottengono delle antenne Yagi a cinque elementi.

Se si utilizza per i tre tipi di antenne sinora analizzate (a tre, quattro, e cinque elementi) un dipolo piegato di ugual diametro in tutta la sua estensione, sarà possibile alimentarle tutte con un cavo coassiale da 75 Ω.

Con la relazione $L = 124/f$ è possibile progettare antenne fino a venti elementi, calcolandone la lunghezza di tutti i direttori, e mantenendo per il dipolo e il riflettore la stessa lunghezza dei casi precedenti.

Le separazioni tra gli elementi in questo caso, sono di 0,15 λ dal dipolo al primo direttore, di 0,18 λ dal primo al secondo direttore, e a partire da questo si pongono tutti i successivi a una distanza di 0,24 λ, tranne l'ultimo, che

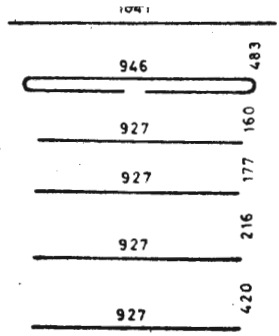


Fig. 7.- Dimensioni dell'antenna Yagi a sei elementi per una discesa a 75 Ω.

viene separato di 0,30 λ.

L'impedenza di un dipolo semplice va dai 30 ai 40 ohm, ed il grande vantaggio di questo tipo di antenna è proprio quello di poter aggiungere o togliere elementi, senza che l'impedenza subisca delle variazioni sensibili.

Il guadagno di questa antenna è compreso tra i 12 e i 18 dB, partendo da 10 elementi fino ai 20.

Nella Fig. 5 viene presentata una antenna Yagi a tre elementi con una impedenza di 300 Ω; il suo guadagno è di 5 dB e il suo rapporto anteriore-posteriore è di 15 dB.

Nella Fig. 6 successiva, è illustrata una antenna a quattro elementi con accoppiamento *gamma mach*, che ne permette l'alimentazione con cavo coassiale da 75 Ω.

Gli elementi dell'antenna sono realizzati con tubo da 6 a 10 mm di diametro, presenta un guadagno di ± 7 dB, e l'apertura dei lobi di irradiazione orizzontale e verticale è rispettivamente di 65° e 75°.

Nell'antenna a sei elementi riportata in Fig. 7, tutti i direttori hanno la stessa lunghezza, e presentano una impedenza di 75 Ω simmetrici, che costringe ad inserire nel circuito un trasformatore con rapporto 1:1 per le discese coassiali, con passo da simmetrico ad asimmetrico.

Il guadagno di questa antenna è di circa 8,5 dB; l'angolo del lobo orizzontale è di 55°, e 70° quello del lobo verticale; gli elementi sono costruiti con tubi o stilo da 5 a 8 mm di diametro.

Proseguendo con le antenne a direttori di ugual lunghezza, nella Fig. 8 è

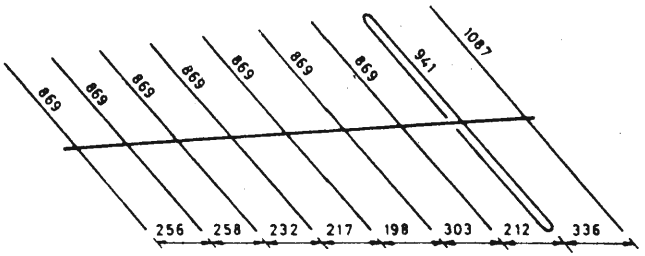


Fig. 8.- Antenna Yagi a 9 elementi. Il guadagno è di 10 dB, e le misure sono espresse in millimetri.

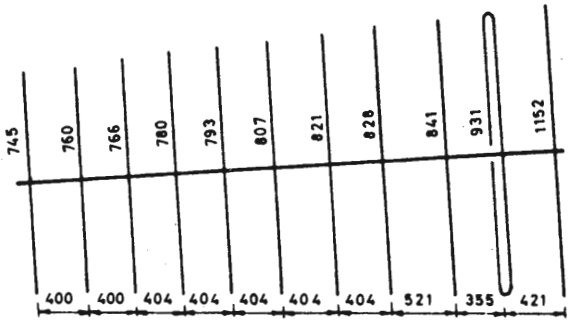


Fig. 9.- Antenna Yagi a 11 elementi. Il guadagno è di 12 dB, e le misure sono espresse in millimetri.

riportata una antenna che fornisce 10 dB di guadagno con 9 elementi, e una relazione anteriore-posteriore di 15 dB, con angolo del lobo di irradiazione orizzontale di 48° e di quello verticale di 58° (man mano che il guadagno aumenta, gli angoli dei lobi di irradiazione vanno restringendosi, poiché l'energia risulta più concentrata).

Gli elementi di questa antenna sono calcolati con un diametro compreso tra 10 e 20 mm; la loro impedenza è di circa 240 Ω.

Una antenna a 11 elementi e guadagno di 12 dB come quella presentata in Fig. 9, copre in modo ottimale la gamma da 142 a 148 MHz; il diametro degli elementi è di 12 mm; l'impedenza è di 240 Ω e il lobo di irradiazione oriz-

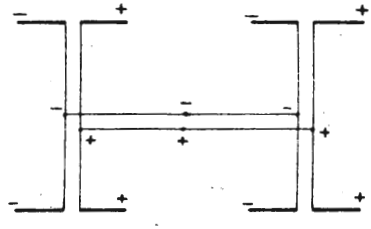


Fig. 10.- Messa in fase di quattro antenne, per ottenerne l'accoppiamento.

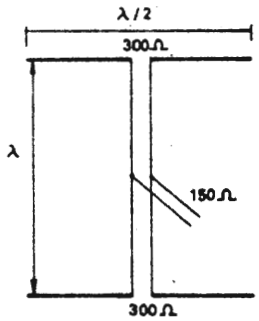


Fig. 11.- Accoppiamento di due antenne sovrapposte.

zontale è di 38°, mentre per quello verticale è di 42°.

Considerazioni pratiche sulle antenne Yagi a 144 MHz

Tutte queste antenne possono essere completamente metalliche, e i loro elementi possono essere fabbricati con tubi di alluminio, latta o rame.

Per via delle loro dimensioni (approssimativamente un metro), vengono supportate nel loro centro, e non necessitano di appoggi alle estremità; il punto medio degli elementi è a zero come valore di tensione, per cui possono essere collegati direttamente a massa.

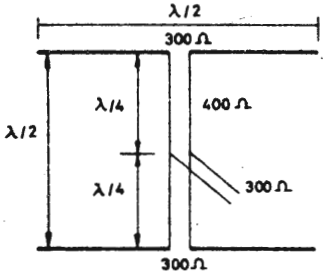


Fig. 12.- Accoppiamento di due antenne con discesa della stessa impedenza.

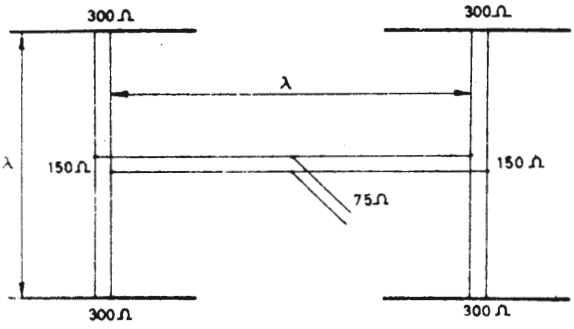


Fig. 13.- Accoppiamento di quattro antenne Yagi con linee aperte.

Una precauzione da prendere rispetto agli isolanti che si utilizzano nella realizzazione dei dipoli, è che devono essere di ottima qualità (alto potere dielettrico) per evitare perdite; l'unione di questi con la linea deve essere fatta con molta cura.

Se possibile, è opportuno effettuare l'unione tramite delle saldature, tenendo presente che, se nel realizzare la connessione si utilizzano metalli diversi (ad esempio alluminio e rame), con l'umidità danno origine ad un accoppiamento galvanico, che con il passare del tempo origina fenomeni di corrosione che influenzano la conduttività della connessione.

E' inoltre consigliabile proteggere questa connessione dalle intemperie;

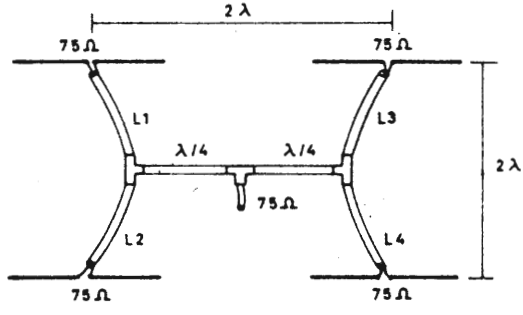


Fig. 14.- Sistema di accoppiamento con quattro antenne, con linee coassiali.

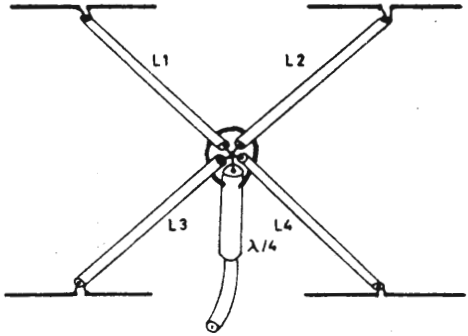


Fig. 15.- Sistema di accoppiamento di quattro lunghezze di linea multiple di mezza onda, connesse per i loro estremi a un trasformatore di impedenza comune.

nel caso si utilizzino condensatori o trasformatori di impedenza, sarà opportuno proteggerli dall'umidità, dalla polvere, ecc. Attualmente sono disponibili degli ottimi materiali isolanti con alto potere dielettrico, che consentono di realizzare queste opportune protezioni.

Il supporto metallico degli elementi può essere di qualsiasi materiale, dal

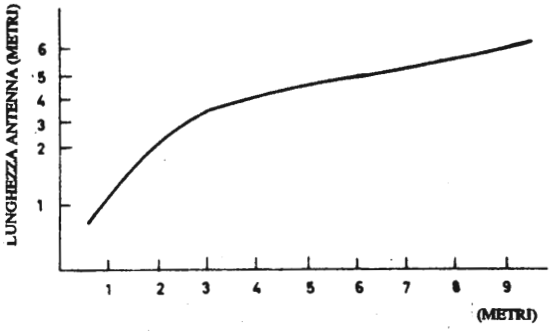


Fig. 16.- Grafico delle distanze di separazione tra due antenne, in funzione della lunghezza dell'antenna.

semplice legno, al ferro, e all'alluminio. Normalmente per antenne molto grosse si utilizza tubo di duralluminio, che permette, con piccole sezioni (20 x 20), una buona rigidità.

Nel caso ci siano problemi di flessione, si utilizzano dei tenditori o degli estensori, poiché per antenne di sei o più metri si dovrebbe utilizzare un tubo di supporto di considerevole diametro, che porterebbe ad una variazione delle dimensioni degli elementi dell'antenna, e quindi influenzerebbe notevolmente il loro rapporto con la lunghezza d'onda.

Accoppiamento di antenne

Anche se teoricamente risulta possibile procedere aumentando il numero degli elementi di una antenna Yagi, è evidente che si arriva ad un punto in cui un ulteriore aumento del numero dei direttori diventa complesso per via dei problemi meccanici (lunghezza dell'antenna), ed elettrici (supporto molto grosso in rapporto alla lunghezza d'onda e agli stessi elementi) che si presenterebbero.

Quando è necessario, si pongono due o più antenne in parallelo per ottenere guadagni più elevati, partendo dal presupposto che, raddoppiando una antenna si ottiene un aumento del guadagno di quasi 3 dB (2,8 dB), ossia, che se si ha una antenna di 10 dB di guadagno, posizionando due antenne convenientemente accoppiate, si otterranno 13 dB.

Se si installano due antenne in più (quattro in totale) di 10 dB ciascuna, si otterrà un guadagno totale pari a 10 + 3 + 3 = 16 dB; volendo nuovamente raddoppiare il numero delle antenne, si raggiungerà un guadagno di 16 + 3 = 19 dB.

Per accoppiare due o più antenne a una sola discesa, occorre tener presente la fase, l'impedenza, e la separazione. Nel riferirci alla fase si ricorda che tutte le antenne del gruppo ricevono un'onda in fase, e la corrente circola in tutte nello stesso verso; pertanto, dovranno essere connesse in modo tale che le correnti si sommino.

Nel caso di connessioni simmetriche, tutti i conduttori centrali dei coassiali andranno sullo stesso lato dei dipoli, poiché in caso contrario le correnti si sottrarrebbero, e invece di aumentare il guadagno, mancherebbe la trasmissione o la ricezione.

Nell'accoppiare più antenne, è conveniente ricordare l'equazione delle resistenze in parallelo, i principi e le equazioni degli adattatori a un quarto di onda, e i lobi di irradiazione delle antenne.

Il caso più semplice di accoppiamento è quello di due antenne sovrapposte, con il quale si ottengono 3 dB o più di guadagno rispetto ad una sola.

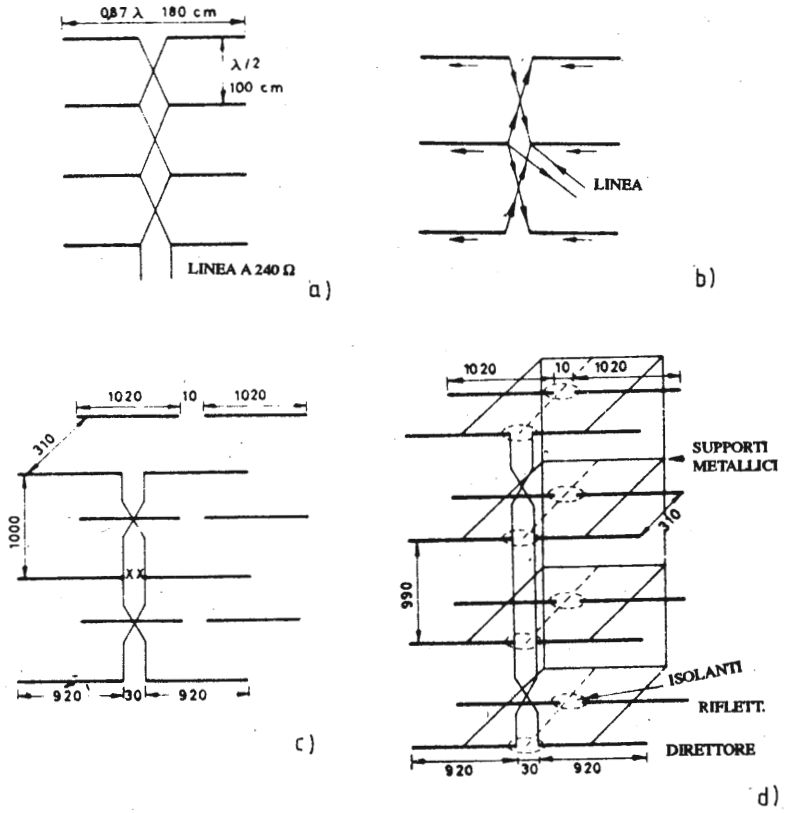


Fig. 17.- Antenne lineari per i 144 MHz: a) antenna bidirezionale con cortina di dipoli lineari; b) alimentazione di una cortina lineare per il suo centro; c) antenna con riflettori passivi (misure in mm); d) antenna a 16 elementi (8 eccitati e 8 riflettori) con un guadagno di 10,5 db.

Questo guadagno si ottiene con la riduzione del lobo verticale; il lobo orizzontale non subisce variazioni rispetto a quello che si avrebbe con una sola antenna.

Supponiamo che queste antenne abbiano una impedenza di 300 Ω. Ponendole in parallelo su di una linea di questo valore, nel punto centrale della stessa si troverà 300 : 2 = 150 Ω, che permette di utilizzare una discesa di questo valore o, tramite un trasformatore di impedenza, di connetterlo con una li-

nea di altro valore.

Con due antenne da 300 Ω, e sfruttando la proprietà delle linee a un quarto di onda la cui impedenza è uguale alla radice quadrata del prodotto dell'impedenza di ingresso per quella di uscita, è possibile connettere a ciascuna antenna una linea a un quarto di onda di 400 Ω, la quale, nell'altro estremo, rifletterà 600 Ω; ponendo in parallelo i due estremi a un quarto di onda, si otterrà 600 : 2 = 300 Ω, per collegarle a una linea di questo stesso valore di impedenza.

Per quel che riguarda l'unione di quattro antenne, prima si connettono due a due, e poi si parte dai due estremi risultanti e si procede come se si trattasse di due antenne.

Supposto che le due antenne abbiano una impedenza di 75 Ω, e anche la discesa sia di 75 Ω, si possono connettere nel modo esposto in Fig. 14, dove L1, L2, L3, L4 avranno esattamente la stessa lunghezza, calcolata con l'equazione:

$$L1 = L2 = L3 = L4 = n \times \frac{\lambda \times v}{2}$$

L5 e L6 si ottengono invece dall'equazione:

$$L5 = L6 = \frac{\lambda \times v}{4}$$

dove v è il *fattore di velocità* del cavo utilizzato. L'impedenza risulta di 75 Ω.

Quando le antenne sono a 52 Ω, e la discesa è anch'essa a 52 Ω, si segue la stessa impostazione, con la particolarità che bisogna realizzare la linea con cavo a 52 Ω di impedenza.

Questi procedimenti si possono semplificare utilizzando quattro lunghezze di linea multiple dell'onda media, connesse per i loro estremi a un solo trasformatore di impedenza, che eleva l'impedenza al valore della linea.

Se le antenne sono a 75 Ω, all'entrata del trasformatore si avrà 75 / 4 = 18,75 Ω, e il trasformatore dovrà essere di 37,5 Ω per una impedenza di linea di 75 Ω.

Se si tratta di antenne a 52 Ω, l'impedenza all'ingresso del trasformatore a un quarto di onda sarà di 52/4 = 13 Ω, e la sua impedenza $Z_o = \sqrt{13 \times 52}$ = 26 Ω, per una linea di 52 Ω.

Nel caso delle quattro antenne, il guadagno risulta aumentato di 6 dB a

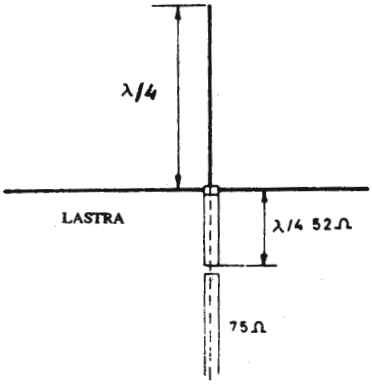


Fig. 18.- Antenna a un quarto di onda (Marconi), alimentata con un quarto di onda della linea a 52 Ω, per adattarla alla linea a 75 ohm.

spese del lobo verticale e orizzontale, facendosi più direttivo nei due sensi.

La separazione delle antenne è un fattore da considerare, e normalmente tanto più è grande una antenna, maggiore separazione è richiesta.

Nella Fig. 16, sono forniti alcuni valori di separazione per diverse lunghezze di antenna.

Antenna lineare per i 144 MHz

Una rete di irradiazione bidirezionale è formata dalla sovrapposizione di dipoli ad onda media, alimentati in fase sugli estremi. Questi gruppi, tipo cortina, hanno determinati vantaggi rispetto alle antenne Yagi convenzionali, quali la maggior larghezza di banda, la semplicità realizzativa e la semplicità di regolazione.

Per ottenere una antenna che, fornendo questi vantaggi, risulti unidirezionale, le si colloca posteriormente, come una cortina, elementi riflettenti che agiscano come elementi parassiti.

Per il calcolo dei dipoli si impiega l'equazione vista per il caso a mezza onda data nel paragrafo delle antenne Yagi, e cioè:

$$L = 143 / f$$

L'antenna lineare di Fig. 17 è costruita con un tubo di 20 mm di diame-

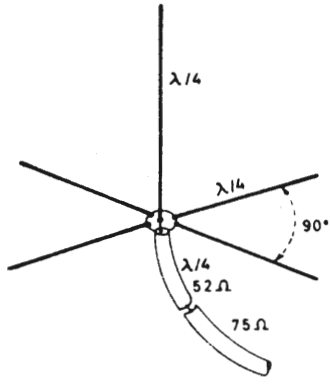


Fig. 19.- Antenna a un quarto di onda con piano di terra artificiale.

tro, e progettata per i 145 MHz, coprendo in questo modo perfettamente la banda da 144 a 146 MHz; ciascuna coppia di dipoli alimentati sugli estremi, ha una impedenza di 1.100 Ω, e ponendone quattro in parallelo si abbassa l'impedenza a 240 Ω, rendendo più semplice la sua alimentazione.

Fig. 20.- Antenna a un quarto di onda a manico.

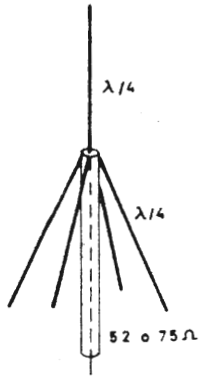


Fig. 21.- Antenna a un quarto di onda con raggi inclinati.

In questa antenna, l'alimentazione viene collegata agli elementi inferiori, ma può essere collegata anche al centro senza alcuna difficoltà; il guadagno del gruppo a cortina è di 6 dB sul dipolo.

Aggiungendo posteriormente a questa alcuni elementi parassiti tagliati a una lunghezza pari a 152/f, e posizionati a 0,5 lunghezze d'onda, si aumenta

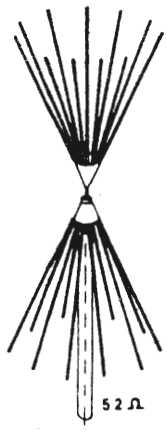


Fig. 22.- Antenna a doppio cono.

il guadagno a circa 9 dB. In questo caso, l'impedenza è di 240 Ω, la relazione anteriore- posteriore di 14 dB, il lobo di irradiazione orizzontale ha un'ampiezza di 60° e quello verticale di 50°.

Con 16 elementi (8 eccitati e 8 riflettenti), il guadagno dell'antenna è di 10,5 dB, e la relazione anteriore-posteriore di 14 dB.

Per la costruzione di queste antenne si utilizzano due metodi: il primo consiste nell'utilizzare un supporto metallico che blocca i punti medi degli elementi (poiché in detti punti non è presente tensione e non vi sono problemi di connessione); il secondo metodo sfrutta degli isolatori che bloccano due elementi sui loro estremi interni.

E' preferibile il primo sistema, per non dare origine a perdite; con il secondo sistema, il materiale isolante influisce sulle dimensioni degli elementi, poiché con il passare del tempo si depositano umidità e polvere che generano delle perdite considerevoli, dato che agli estremi si ha il massimo della tensione.

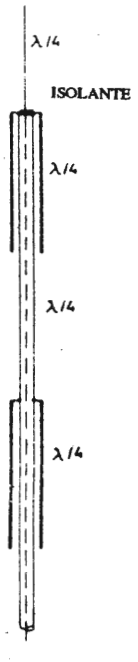


Fig. 23.- Antenna a manico con due elementi lineari.

Antenne con polarizzazione verticale

In questo paragrafo si tratteranno antenne, la cui caratteristica saliente è la loro polarizzazione verticale.

Attualmente, tutto il movimento di comunicazioni sui 144 MHz che viene effettuato tramite i ripetitori e i collegamenti veicolari, si ottiene con questo tipo di polarizzazione, forse per la semplicità che implica l'installazione di una antenna ad un quarto d'onda o a cinque ottavi su di un autoveicolo, in contrapposizione con le difficoltà che si incontrano con una antenna di caratteristiche omnidirezionali e con polarizzazione orizzontale.

La più semplice delle antenne omnidirezionali con polarizzazione orizzontale, è quella a un quarto di onda, o *antenna Marconi*; la lunghezza della stessa viene calcolata con l'equazione L = 71,5 / f se si tratta di un tubo sottile; al contrario, se si tratta di un tubo di dimensioni maggiori, si dovrà sottrarre dalla sua lunghezza una quantità determinata dal rapporto L/D.

Questo elemento viene isolato dal piano di terra, formato dalla capotte della macchina, e collegato al conduttore centrale del coassiale dell'alimentazione, mentre la schermatura viene collegata alla capotte.

Bisogna tener presente il fatto che l'isolatore che regge il quarto d'onda deve avere una capacità shunt la più bassa possibile, e che l'impedenza dell'antenna risulti resistiva, poiché in altro modo non sarebbe possibile ottenere un buon rapporto di onde stazionarie.

Sulla capotte occorre posizionare l'antenna più centrata possibile, e rendere possibile l'estendersi sulla stessa superficie di almeno una mezza onda in

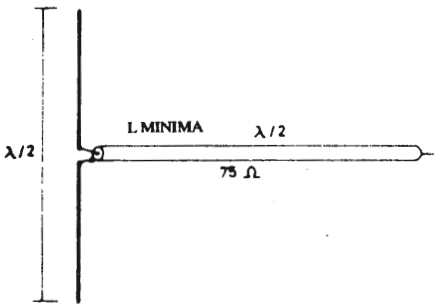


Fig. 24.- Antenna a dipolo verticale.

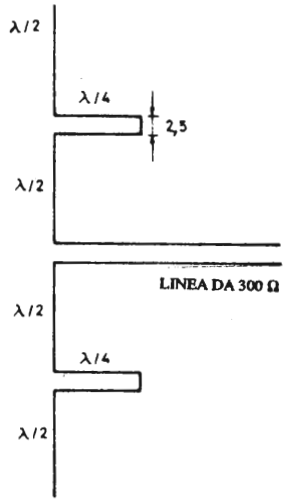


Fig. 25.- Rete lineare con quattro dipoli polarizzati verticalmente.

tutte le direzioni.

L'impedenza dell'antenna a un quarto di onda è normalmente di circa 30 Ω, ed è possibile alimentarla direttamente con un cavo coassiale da 50 Ω, nonostante sia più indicato farlo mediante una linea da quarto di onda a 52 Ω, e in seguito con una linea a 75 Ω.

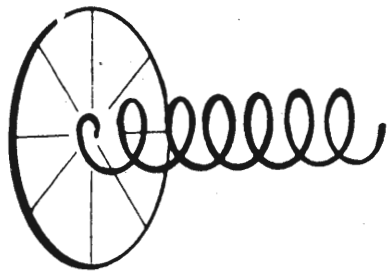


Fig. 26.- Antenna elicoidale.

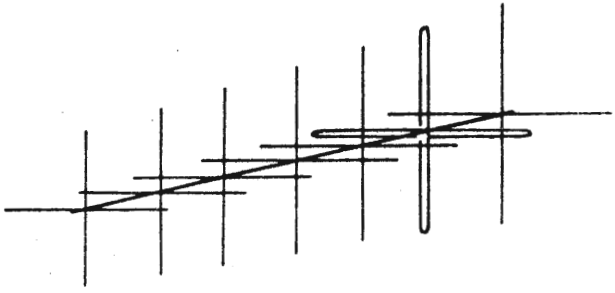


Fig. 27.-Antenna incrociata per ottenere la polarizzazione circolare.

E' possibile interporre un quarto di onda a 37,5 Ω realizzato con due pezzi di RG11 o RG59 in parallelo: in questo modo si ottiene un basso rapporto di onde stazionarie, con una discesa a 52 Ω.

La stessa antenna può essere montata in alto su di un palo, creandole un piano di terra artificiale realizzato con quattro conduttori a un quarto d'onda disposti orizzontalmente e perpendicolari tra di loro; l'impedenza è di 30 Ω e si può alimentare questa antenna seguendo i procedimenti descritti precedentemente.

Anche se il palo è metallico, i rami a un quarto d'onda possono essere montati su di esso direttamente, poiché gli estremi connessi alla massa del cavo sono a potenziale zero.

Per collegare un cavo coassiale da 52 Ω direttamente all'antenna a un quarto d'onda, senza ricorrere ad alcun accoppiamento speciale, vi sono diverse varianti della stessa con modifiche del piano di terra, che elevano l'impedenza a tale valore.

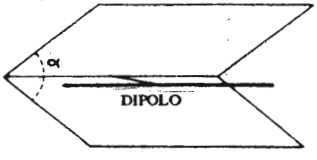
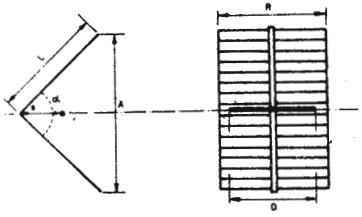


Fig. 28.- Antenna con riflettore angolare.



Banda	L	s	d	D	R	A
144	254	101	15	96	127	254
432	89	33	3,8	32,3	51	89
1296	30,4	11,4	1,2	10,1	20,3	30,4

Fig. 29.- Dimensioni dell'antenna con riflettore angolare: a) vista laterale; b) tabella dei valori per le bande dei 144, 432 e 1296 MHz.

Una di queste è l'antenna a manicotto a un quarto di onda, nella quale la metà inferiore dell'antenna è formata da un tubo a un quarto di onda, nel cui interno passa il cavo coassiale. Un'altra possibile versione presenta i raggi inclinati; in funzione della loro inclinazione, è possibile il collegamento con linee coassiali a 75 o 52 Ω.

La pratica ha dimostrato che per questo tipo di antenna il numero minimo di radiali è tre, ed il massimo sei; a partire da questo numero le caratteristiche dell'antenna non subiscono influenze nel caso si aggiungessero altri raggi, e il rendimento della stessa non migliora.

La larghezza di banda di queste antenne può essere aumentata sostituendo il raggio a un quarto di onda dell'elemento irradiante con diversi altri disposti a forma di cono, simile alla sua parte inferiore; in questa antenna la lunghezza dei raggi è di 0,2 lunghezze d'onda, la larghezza di banda arriva ad un rapporto di 2:1 per la gamma di frequenza con ROS basso.

Normalmente si utilizzano da 8 a 10 raggi per elemento irradiante e uno stesso numero per il piano di terra.

Antenna lineare a manicotto

Precedentemente si è vista la forma dell'antenna a manicotto. Sovrapponendo diverse di queste, si può ottenere una antenna omnidirezionale a polarizzazione verticale, e con un certo guadagno.

Nella Fig. 23 viene presentata una antenna a due sezioni che fornisce un guadagno di 2,8 dB, su cui si possono inserire tanti elementi per ottenere un guadagno maggiore.

Per 10 elementi collegati come una serie di pile si otterrà un guadagno di 10 dB.

Antenna a dipolo verticale

Se si colloca un dipolo in posizione verticale, irradierà onde polarizzate in questo verso, e formerà un lobo di irradiazione nel piano orizzontale, quasi omnidirezionale. La linea di alimentazione del dipolo, così installato, richiede di essere perpendicolare a questi, per almeno un tratto lungo metà lunghezza d'onda, per evitare mutue influenze.

A partire dai dipoli verticali, si possono formare reti lineari di irradiazione verticale, che daranno un guadagno approssimativo di 1 dB per ogni elemento sovrapposto; l'alimentazione e l'accoppiamento sono simili a quelli delle reti lineari in posizione orizzontale.

Per ottenere una polarizzazione verticale, si può utilizzare anche qualsiasi antenna con polarizzazione orizzontale, ruotata di 90°, ottenendo così le caratteristiche di direttività e guadagno proprie di quelle nel piano verticale; si possono così utilizzare antenne Yagi, romboidali, ecc. , per la polarizzazione verticale, posizionandone gli elementi verticalmente.

Polarizzazione circolare

Per le VHF e UHF si utilizzano a volte onde polarizzate circolarmente.

Queste onde hanno i loro componenti ripartiti come nella polarizzazione verticale e nella polarizzazione orizzontale; lungo il suo cammino, l'onda polarizzata circolarmente può avvitarsi a destra o a sinistra, se la componente verticale procede in avanti o all'indietro rispetto a quella orizzontale.

Una antenna con queste caratteristiche è l'antenna elicoidale, composta da una serie di spire di ugual diametro, di un terzo della lunghezza d'onda, disposte su di un piano di terra artificiale, formato da un cerchio di 0,8 lunghezze d'onda.

Quante più spire avrà l'antenna, maggiore sarà il suo guadagno; con sei spire si raggiungono 12 dB di guadagno, essendo l'impedenza dell'antenna di 150 Ω.

Un altro sistema per ottenere questo tipo di polarizzazione circolare sfrutta due dipoli, o antenne Yagi, una con polarizzazione orizzontale e l'altra nel piano verticale. In funzione del tipo di alimentazione, si otterrà una polarizzazione circolare destrosa o sinistrosa.

Antenna con riflettore angolare

Abbiamo visto che dietro a un dipolo si può porre un elemento parassita, per direzionare l'energia irradiante verso una determinata direzione; questo può essere costituito da una superficie la quale, se ha la forma di V, fornirà un maggior guadagno.

Detto guadagno viene determinato dalla distanza del dipolo, dall'angolo che formano i piani del riflettore a forma di V, e dall'area di questa superficie; anche l'impedenza risulterà influenzata da queste variabili.

In pratica, l'angolo è compreso tra 60° e 90°, e il guadagno di questo angolo oscilla tra i 10 e i 15 dB.

Di seguito vengono fornite delle misure per questa classe di antenne, nelle bande dei 144-432-1296 MHz.

Antenna parabolica

Un'altro elemento che sfrutta il principio della superficie riflettente per ottenere grandi guadagni, sempre che il rapporto area della superficie/lunghezza d'onda risulti grande, è *l'antenna parabolica*.

Come indica il suo nome si tratta di un *riflettore parabolico*, nel cui fuoco si installa il dipolo; il suo lobo di irradiazione è stretto nei piani verticale e orizzontale, e da qui ha origine il suo grande guadagno.

Però, essendo questo lobo molto direzionale, viene richiesta una rigidità meccanica molto elevata durante la costruzione e l'installazione, poiché il minimo movimento produrrà una forte attenuazione del segnale a distanza.

Questo tipo di antenna viene impiegata per la ricezione dei satelliti e nei grandi osservatori, anche se attualmente molti radioamatori la utilizzano per le loro comunicazioni in UHF e in SHF.

CAPITOLO 7

LINEE DI TRASMISSIONE

Dopo aver analizzato in profondità il tema relativo alle antenne emittenti e riceventi, dedichiamo il presente capitolo agli aspetti più interessanti relativi alle *linee di trasmissione*, che sono un complemento imprescindibile di qualsiasi installazione di antenna, sia di trasmissione, che di ricezione. Con questo capitolo si pensa di aver esplicato esaurientemente il tema principale.

Viene definita *linea di trasmissione*, ogni mezzo artificiale con cui si trasporta energia da un punto ad un altro. Nel nostro caso, la linea di trasmissione è quella che può trasportare energia in radiofrequenza tra il trasmettitore e l'antenna, tra l'antenna e il ricevitore, o tra due apparecchiature tra le quali esiste una separazione fisica concreta.

Ogni linea di trasmissione ha alcune speciali caratteristiche che la differenzia dalle altre, risultando il suo guadagno funzione dell'applicazione alla quale è stata destinata, o dell'onda in radiofrequenza che la stessa trasporta.

Relativamente alla loro costituzione fisica, le linee di trasmissione possono essere classificate in: unifilari, multifilari, piattine, tubolari, coassiali, e a guida d'onda.

In funzione dell'utilizzo, si classificano in due grandi gruppi: aperiodiche (non risonanti), e periodiche (sintonizzate).

Altro importante fattore da considerare, è che le linee di trasmissione non devono irradiare energia, ma devono trasportarla con il maggior rendimento possibile.

Impedenza di una linea

Una delle caratteristiche più importanti delle linee di trasmissione è la loro *impedenza*, che è fisicamente determinata dai materiali che la costituiscono, dal diametro, dalla disposizione dei conduttori, e dal dielettrico che li separa.

Il valore Zo dell'impedenza caratteristica di una linea di trasmissione si ricava dall'equazione:

$$Zo = \sqrt{L/C}$$

nella quale Zo è l'impedenza caratteristica, L è il coefficiente di autoinduzione della linea, e C la sua capacità per unità di lunghezza.

Per la stessa concezione di Zo, si può affermare che tutta la linea di trasmissione ha un determinato valore di impedenza caratteristica.

Fattore di velocità

Si chiama *fattore di velocità* il rapporto tra la velocità con la quale un'onda radio viaggia in una linea di trasmissione, e la velocità con la quale si propagherebbe in una linea teorica che ha come dielettrico il vuoto, con fattore di velocità uno. In linee reali, questo fattore risulterà sempre inferiore a uno, poiché lo è anche la costante dielettrica.

Evidentemente tanto minore sarà il fattore di velocità, più tarderà il segnale a percorrere la linea in questione.

Onde stazionarie

Quando circola un'onda radio in una linea di trasmissione, l'impedenza cambia improvvisamente; una parte dell'energia viene riflessa verso il generatore, e si formano delle *onde stazionarie*. Pertanto su di una linea si avranno due onde, una che circola dal generatore verso l'estremo della linea, e l'altra da un punto discontinuo al generatore, in modo tale che vengono a formarsi lungo la linea, alcuni punti nei quali la tensione varia da zero al doppio del suo valore; la stesso effetto avviene per la corrente, nei punti intermedi.

Per analizzare l'effetto delle onde stazionarie, si consideri una linea accoppiata ad un estremo al generatore di radiofrequenza, con l'altro estremo in

cortocircuito. In questo punto si avrà un massimo di corrente e uno zero di tensione.

Il valore istantaneo della corrente riflessa sarà differente lungo la linea; in alcuni punti sarà tale che le fasi della corrente riflessa e quella di uscita si annulleranno tra di loro, mentre in altri si sommeranno.

La distanza di questi punti varia in funzione del fattore di velocità della linea e della frequenza dell'onda, in modo tale che, se sull'estremo in cortocircuito le correnti sono in fase, rimarranno tali anche a una distanza multipla della metà della lunghezza d'onda.

Nel caso in cui l'estremo opposto al generatore risultasse aperto, la corrente e la tensione circolano in concordanza di fase per tutta la lunghezza, fino a che non giungono all'estremo aperto. In questo punto la corrente diminuisce, poiché non ha possibilità di circolare, e tende a ripetere il suo percorso, ma verso il generatore; all'estremo aperto della linea è presente un massimo di tensione.

Se all'estremo aperto la corrente è in fase, ritornerà a esserlo in un punto distante da quello un quarto di onda, e in tutti i multipli dispari di questo.

L' onda riflessa ha la stessa velocità di propagazione, sulla linea di trasmissione, dell'onda incidente.

Terminazione delle linee

Nel paragrafo precedente abbiamo considerato i casi in cui la linea di trasmissione termina con un cortocircuito o resta aperta. Quando la linea termina con una resistenza pura, parte della potenza in radiofrequenza viene assorbita dalla stessa resistenza, e la potenza riflessa sarà minore di quella incidente.

Di conseguenza in nessun punto della linea la tensione e la corrente dell'onda riflessa potranno annullare la tensione e la corrente dell'onda incidente.

Nel caso in cui la linea sia chiusa su di una resistenza pura, la forma dell'onda stazionaria sarà intermedia tra quella che si forma in una linea chiusa in cortocircuito e quella di una linea aperta; la separazione tra i moduli della corrente e della tensione, continua a essere di 90°.

La linea può chiudersi su una grossa capacità e su di una piccola induttanza; in questo caso la forma dell'onda stazionaria si avvicina a quella del cortocircuito.

Nel caso termini con una induttanza e una piccola capacità, si avvicinerà alla forma d'onda di una terminazione con linea aperta.

Rapporto di onde stazionarie (ROS)

Il rapporto dei valori massimo e minimo di tensione o di corrente misurati lungo la linea, determina il *rapporto di onde stazionarie.*

Quando la potenza è assorbita completamente dal carico all'estremo della linea, il rapporto di onde stazionarie è pari a uno. Se la linea è chiusa con una resistenza pura avremo che il rapporto di onde stazionarie (ROS) sarà il rapporto tra l'impedenza del carico e l'impedenza di linea:

$$ROS = \frac{Zr}{Zo}$$

Quanto maggiore sarà il coefficiente di riflessione, maggiore sarà l'ROS normalmente riferito alla corrente o alla tensione.

Perdite nella linea di trasmissione

Le perdite nelle linee di trasmissione sono normalmente dovute agli isolatori e ai conduttori. Le prime sono direttamente proporzionali alla frequenza, mentre le seconde aumentano in funzione della radice quadrata della frequenza, a causa dell'effetto pellicolare dei conduttori, che avranno più re-

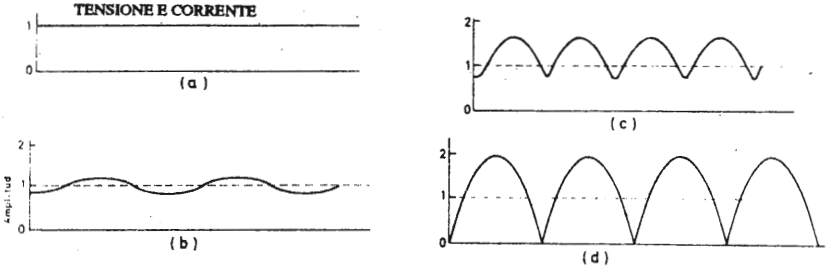


Fig. 1.- Valori di tensione e di corrente lungo una linea: a) linea finita con la sua impedenza. ROS = 1; b) linea chiusa su di un carico con indice di riflessione di 0,2. ROS = 1,5 c) linea chiusa su di un carico con indice di riflessione di 0,5. ROS = 3 d) linea chiusa in cortocircuito o aperta. ROS = ∞.

sistenza effettiva quanto più alta è la frequenza del segnale che circola al loro interno.

Le alte frequenze influiscono molto sulle perdite dovute al dielettrico, e più diminuisce la frequenza del segnale, più le perdite ohmiche diventano preponderanti nel computo finale.

Nelle linee di trasmissione che attualmente vengono realizzate, con l'eccezione dell'attenuazione graduale della potenza sulla loro lunghezza, le perdite segnalate sono insignificanti, se si utilizzano le linee di trasmissione per le quali sono state progettate.

Quando la linea di trasmissione ha perdite elevate, l'onda incidente subisce una attenuazione mentre procede verso il terminale, e l'onda stazionaria subisce lo stesso effetto; si può dire che l'effetto prodotto dall'allungamento di una linea dissipativa consiste nel ridurre il rapporto delle onde stazionarie verso il generatore.

Efficacia di una linea di trasmissione

L'*efficacia* di una linea di trasmissione, viene determinata dalla differenza tra la potenza misurata all'inizio di questa, e quella fornita al terminale; questa differenza è la potenza dissipata dalla linea, e si esprime in dB per unità di lunghezza e frequenza.

Nel caso siano presenti onde stazionarie lungo la linea, la potenza dissipata verrà aumentata da queste.

Anche se l'attenuazione di una linea risultasse bassa, non si deve lavorare con un ROS alto, poiché questo influisce sulla dissipazione della linea, e la tensione tra i conduttori aumenta proporzionalmente, portando ad aumentare la separazione tra questi, o a utilizzare migliori isolatori per una stessa frequenza di lavoro.

Linee risonanti

Si denomina *linea risonante* o sintonizzata quella che è sensibile alla frequenza della corrente che circola nel suo interno, risultando l'impedenza di ingresso funzione della sua lunghezza e della frequenza. La sua lunghezza deve essere un multiplo di mezza lunghezza d'onda della frequenza di lavoro, e l'impedenza di ingresso deve essere uguale a quella di carico.

Lungo una linea risonante circolano una grande quantità di onde stazionarie, dovute a un errato adattamento di impedenza con il carico o perché, deliberatamente, si è progettato il gruppo in modo che operi in queste condizioni;

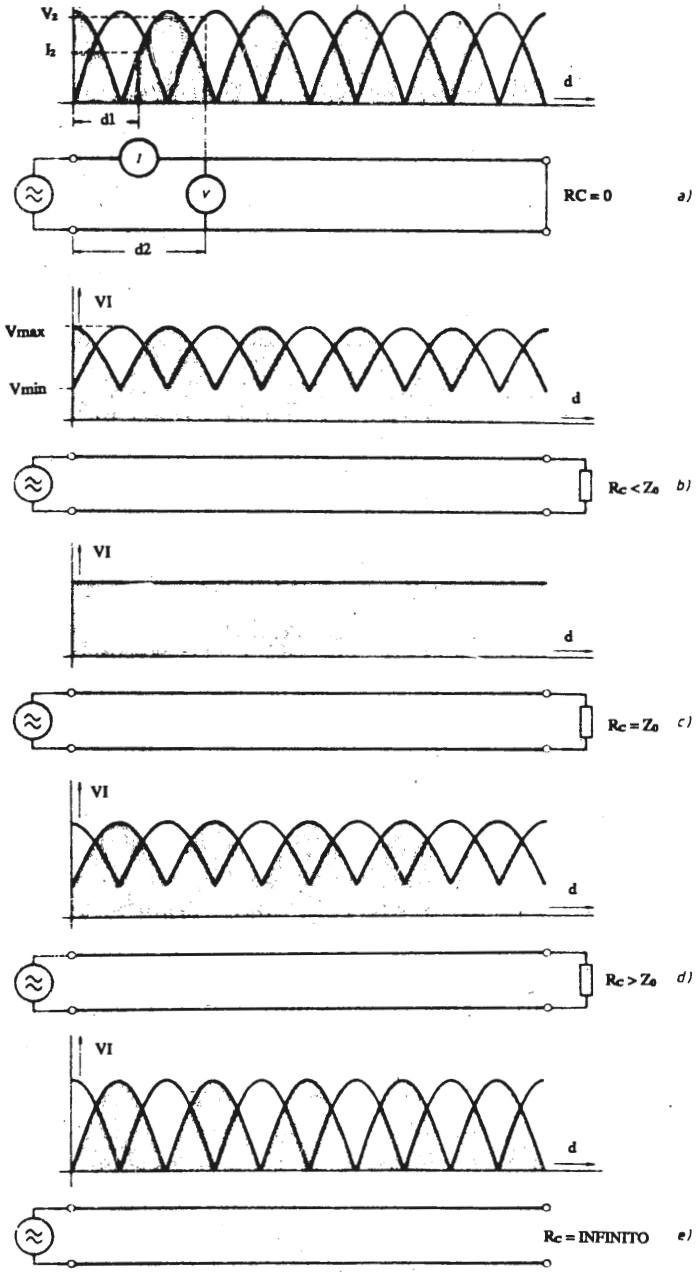


Fig. 2.- Distribuzione della corrente e della tensione in una linea quando: a) Rc = 0; b) Rc < Zo; c) Rc = Zo; d) Rc > Zo; e) Rc = ∞.

questo, causa un aumento della dissipazione, una riduzione della sua efficacia, e un aumento delle dimensioni fisiche della linea.

Linee non risonanti

In una linea in cui il ROS è basso, l'impedenza non varia con la lunghezza, essendo molto prossima a quella di carico. In queste condizioni si parla di linea di trasmissione *non risonante*, che permette di lavorare con qualsiasi frequenza e lunghezza, essendo la distribuzione della tensione e della corrente uniforme per tutta la sua lunghezza.

Irradiazione delle linee

Una linea di trasmissione percorsa da una corrente alternata crea nelle sue vicinanze un campo elettrico e uno magnetico. Quando si tratta di basse frequenze, il campo creato in un semiciclo ritorna al conduttore nel semiciclo opposto e si annulla; alle onde radio non viene dato il tempo di ritornare al conduttore durante l'altro semiciclo, e quindi si irradia nello spazio parte dell'energia elettromagnetica.

Nel caso di linee bifilari, i campi creati dai conduttori hanno la stessa intensità, ma il verso opposto, per cui si annullano vicendevolmente.

In pratica, può succedere che una piccola parte si irradi, poiché i conduttori si trovano un po' separati, essendo questa irradiazione funzione della separazione. Nel caso si tratti di una linea piana ed equilibrata in cui il rapporto tra la separazione tra i conduttori e la lunghezza d'onda è minore di 0,01, si può considerare nullo il campo irradiato.

L'irradiazione è un'ulteriore perdita della linea di trasmissione, e aumenta considerevolmente nel caso di linee risonanti o con molte onde stazionarie.

Linee bifilari

Una *linea di trasmissione bifilare*, è quella costituita da due conduttori paralleli posizionati uno accanto l'altro, per evitare irradiazioni e induzioni.

I conduttori sono mantenuti separati da un materiale isolante: cristallo, polietilene o altro, a bassa perdita e convenientemente posizionato, in modo tale che il dielettrico risulti, per la maggior parte, l'aria.

La linea bifilare è a bassa perdita ed economica, anche se la sua instal-

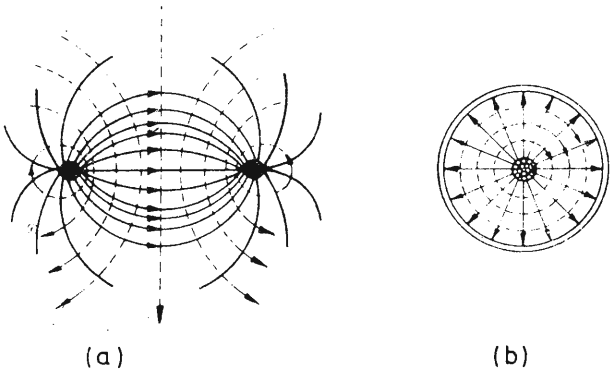


Fig. 3.- Irradiazione delle linee. a) Linea bifilare. b) Linea coassiale. Il campo elettrico è disegnato con le linee continue, quello magnetico con quelle tratteggiate.

lazione è complessa, poiché deve essere mantenuta in tensione per conservare il suo parallelismo e la sua simmetria; occorre anche tenerla lontana dagli oggetti metallici e dalle pareti, ed è consigliabile che nelle sue vicinanze si realizzino diverse trasposizioni, per uguagliare l'effetto capacitivo dei conduttori con il terreno.

L'impedenza caratteristica di questo tipo di linea viene data dalla equazione:

$$Zo = 276 \times \log \frac{D}{d}$$

dove D è la distanza tra i conduttori, e d il diametro di questi.

L'impedenza più comune di queste linee è compresa tra i 400 e i 600 Ω, ma possono essere progettate per altre impedenze, utilizzando gli stessi conduttori ma variandone la separazione.

In queste linee, le perdite sono ridotte al minimo poiché, per frequenze superiori ai 30 MHz, solo un eccellente cavo coassiale con dielettrico gassoso le può eguagliare: a 30 MHz le perdite sono di 0,09 dB ogni 30 metri.

Oltre questa frequenza, esiste il problema costituito dagli isolatori che, avendo una costante dielettrica diversa da quella dell'aria, producono irregolarità nella linee, che portano a riflessioni e perdite apprezzabili.

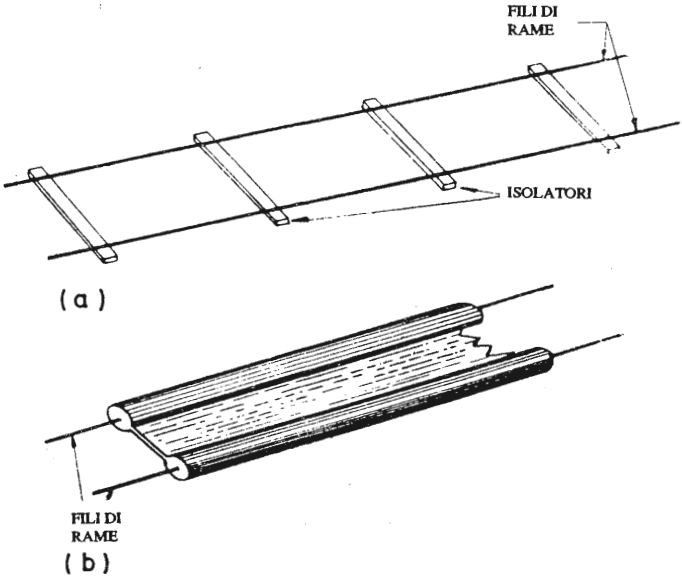


Fig. 4.- a) Cavo bifilare con isolamento in aria. b) Cavo bifilare con dielettrico solido, detto anche piattina.

Nel caso si utilizzi questa linea nella trasmissione delle onde VHF, si deve evitare che la separazione tra gli isolatori sia una semionda della frequenza di lavoro, perché se lo fosse, le riflessioni si sommerebbero al termine della linea, producendo una forte discontinuità; il miglior modo di sistemarli è in forma irregolare.

Il fattore di velocità di una linea bifilare è normalmente compreso tra 0,95 e 0,98, e dipende dal numero degli isolatori e dalle loro dimensioni.

L'irradiazione si riduce di molto se la separazione tra conduttori è piccola in confronto alla lunghezza d'onda utilizzata; l'irradiazione aumenta in presenza di onde stazionarie, e con lo squilibrio del sistema o la sua asimmetria.

Vi sono diverse varianti commerciali di queste linee: una di queste ha un isolamento in aria, e i conduttori mantengono la loro separazione mediante isolatori di polietilene modellati su di loro.

Un altro tipo è quella definita *piattina*,in cui il materiale dielettrico è presente per tutta la lunghezza della linea, e mantiene i conduttori paralleli al suo

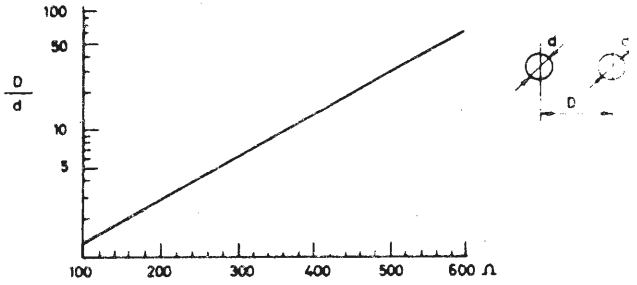


Fig. 5.- Impedenza di una linea bifilare con isolamento in aria, in funzione dei diametri dei conduttori e della separazione tra gli stessi.

interno. Nel tipo a piattina, vengono utilizzati conduttori multifilari per conferirle flessibilità, essendo l'isolante un materiale plastico a bassa perdita come il PVC, il polietilene, o il teflon. Normalmente è a 300 Ω, e veniva molto utilizzata per le discese delle antenne televisive.

Vengono anche fabbricate altre piattine più robuste per essere utilizzate nella trasmissione. Come si comprenderà, l'impedenza di questa linea subisce

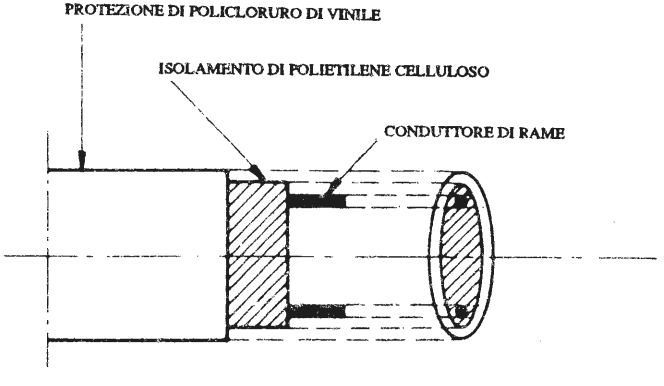


Fig. 6.- Struttura di un cavo ovale bifilare.

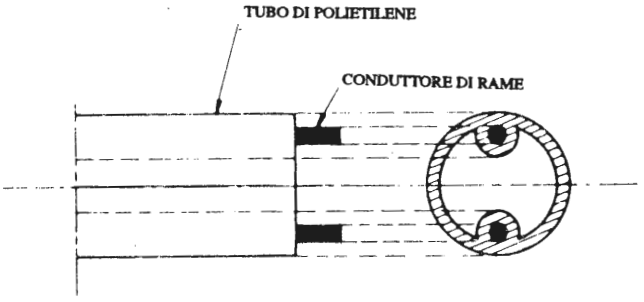


Fig. 7.- Struttura di un tubo bifilare.

le inclemenze del tempo, ed è molto facile che su questo tipo di conduttore si depositino polvere, acqua, ecc., che ne modificano il fattore dielettrico e, pertanto, la sua impedenza.

Infine, esiste anche una linea a 75 Ω.

Il fattore di velocità, in tutti i tipi di piattina in condizioni di tempo secco, è di circa 0,82, con una perdita di 2 dB o più per lunghezze di 30 metri e onde di 100 MHz.

Altri modelli di linee bifilari sono, per esempio, il cavo ovale bifilare, il

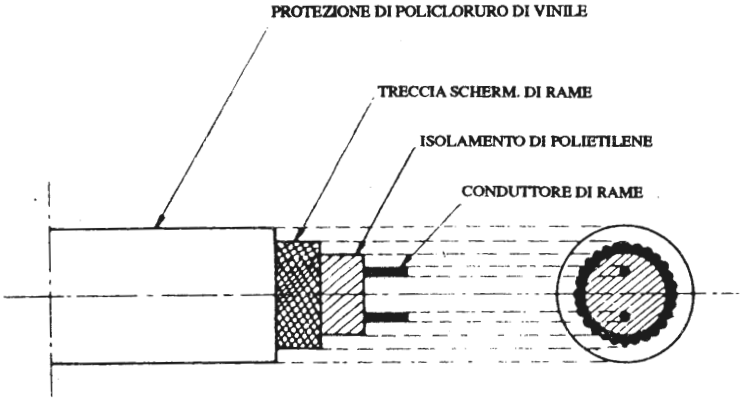


Fig. 8.- Struttura di un cavo bifilare schermato.

tubo bifilare, e il cavo bifilare schermato.

Il *cavo ovale bifilare*, ha una impedenza di 300 Ω,e viene realizzato con isolamento di polietilene celluloso o espanso, con il tutto protetto da uno strato di PVC.

Il *tubo bifilare* si realizza con una impedenza di 300 Ω, e la conservazione risulta migliore rispetto a quella della piattina bifilare, anche se si devono evitare infiltrazioni di acqua e umidità al suo interno, poiché potrebbe prodursi una condensa che modificherebbe la costante dielettrica della linea.

Il *cavo bifilare schermato* si realizza in diversi modelli, tutti basati sullo stesso principio: quello di evitare di captare interferenze o disturbi industriali sulla linea, ed evitare di subire gli effetti delle pareti e degli oggetti metallici posti vicini al percorso della linea. Vengono fabbricati con impedenze di 75, 150 e 300 Ω.

Cavi intrecciati

Si può improvvisare una linea di circa 75 Ω di impedenza, con il filo utilizzato nelle installazioni elettriche comuni. Per far ciò servono due fili di rame di 2 mm, con isolamento plastico, ritorti uno sull'altro.

Questa linea, oltremodo economica, non è facilmente attaccabile dagli agenti esterni, può passare relativamente vicino agli oggetti metallici, e la sua

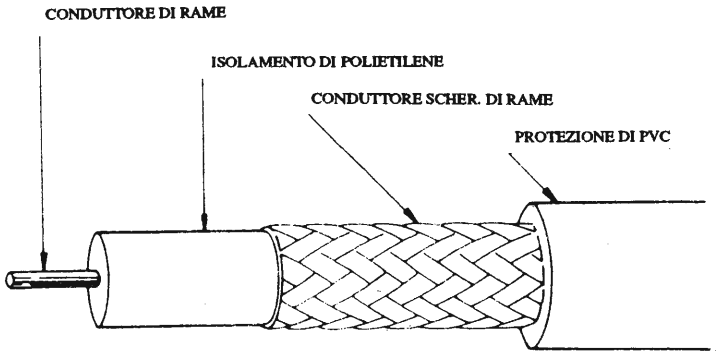


Fig. 9.- Struttura di un cavo coassiale.

attenuazione è inferiore a 3 dB ogni 30 metri, per frequenze inferiori ai 30 MHz. Il suo fattore di velocità varia tra 0,6 e 0,7, in funzione del suo isolamento.

Linee coassiali

Questa linea è formata da un conduttore ubicato al centro della circonferenza formata da un altro conduttore, in modo che il primo conduttore risulti avvolto dal secondo, in maniera equidistante. Per mantenere questo spaziamento equidistante si utilizzano diversi materiali dielettrici, dal polietilene al teflon.

Tutti i cavi coassiali a dielettrico solido, vengono molto utilizzati per la loro semplicità di installazione; il conduttore esterno deve essere avvolto da uno strato di plastica per la sua protezione (normalmente vinile).

Il conduttore centrale è formato da diversi fili di minor diametro, intrecciati tra di loro per conferirgli una maggiore flessibilità, che formano un conduttore multifilare; tra questo e quello esterno viene interposto il dielettrico, che deve avere caratteristiche di inalterabilità, resistenza, e una buona costante dielettrica.

Il materiale più comune utilizzato per questi scopi è il polietilene, che rimane flessibile per temperature comprese tra - 40 e +80 °C. Si tratta di un materiale stabile e inerte, di colore grigio chiaro traslucido, che fonde a 100 °C,e solidificandosi ritorna al suo aspetto precedente.

Gli altri materiali utilizzati, come la schiuma di poliuretano e il teflon, migliorano il fattore di velocità e di attenuazione del cavo.

La descrizione precedente è relativa ai cavi coassiali flessibili che hanno la sigla di RG/U, seguita dal numero di identificazione; sono cavi flessibili, tra gli altri, i numeri 58, 80, 55, 59, 11, 12, ecc., che possono essere piegati in qualsiasi direzione con raggi molto piccoli, e permettono arrotolamenti e direzionamenti.

Per lavori più pesanti esistono, nella vasta gamma RG.../U, i cavi 17, 18, 19 e 20 della tabella aggiuntiva, che hanno come conduttore centrale un solo filo di dimensioni maggiori. Vengono considerate linee semirigide che possono essere curvate con un raggio dieci volte superiore al loro diametro, e rimangono fissi in quella posizione una volta installati.

Esistono anche linee coassiali il cui dielettrico è l'aria o un gas inerte; in queste, il conduttore centrale viene mantenuto equidistante da quello esterno tramite del materiale isolante posto a intervalli lungo il cavo.

L'ideale sarebbe la non presenza di questi separatori, ma in pratica questo è impossibile.

CAVO	IMPEDENZA	FATTORE V	ATTENUAZIONE IN DB OGNI 30 m
RG5/U	52,5	0,659	2,9
RG5B/U	50	0,659	2,4
RG6A/U	75	0,659	2,9
RG8A/U	50	0,659	2
RG9/U	51	0,659	2
RG9B/U	50	0,659	2,1
RG10A/U	50	0,659	2
RG11A/U	75	0,66	2,3
RG12A/U	75	0,659	2,3
RG13A/U	75	0,659	2,3
RG14A/U	50	0,659	1,4
RG16/U	52	0,67	1,2
RG17A/U	50	0,659	0,8
RG18A/U	50	0,659	0,8
RG19A/U	50	0,659	0,68
RG20A/U	50	0,659	0,68
RG21/AU	50	0,659	13,00
RG29/U	53,5	0,659	4,4
RG34A/U	75	0,659	1,3
RG34B/U	75	0,66	1,4
RG35A/U	75	0,659	0,85
RG54A/U	58	0,659	3,1
RG55/U	53,5	0,659	4,8
RG55A/U	50	0,659	4,8
RG58/U	53,5	0,659	4,65
RG58C/U	50	0,659	4,9
RG59A/U	75	0,659	3,4
RG59B/U	75	0,66	3,4
RG62A/U	93	0,84	2,7
RG74A/U	50	0,659	1,5
RG83/U	35	0,66	2,8
RG213/U	50	0,66	1,9
RG218/U	50	0,66	1,0
RG220/U	50	0,66	0,7

Tabella 1.- Caratteristiche dei cavi coassiali della serie RG.

Queste linee sono le più efficienti, ma sono molto difficili da installare, e risultano convenienti solo per installazioni definitive di emittenti TV o FM.

Sono costituite da due tubi di rame concentrici, l'interno dei quali viene

riempito con aria secca o con nitrogeno a bassa pressione (non si crea il vuoto poiché una piccolissima fuga causerebbe l'ingresso di aria umida, provocando la perdita delle caratteristiche del cavo).

In questo modo, una fuga causa solamente una perdita del gas, e le caratteristiche del cavo rimangono inalterate senza alcun problema.

In tutti questi cavi bisogna mantenere l'eccentricità e i diametri entro determinati valori di tolleranza minima, poiché altrimenti, si produrrebbero facilmente delle riflessioni, più rilevabili nelle bande VHF e UHF.

Per questa ragione, l'impedenza caratteristica dei cavi coassiali con dielettrico solido viene determinata più esattamente di quella dei cavi con dielettrico in aria, i cui separatori o la loro installazione possono provocare discontinuità. Per la connessione dei cavi coassiali esiste in commercio una ampia gamma di accessori e connettori, che ne conservano l'impedenza e presentano poche perdite di giunzione.

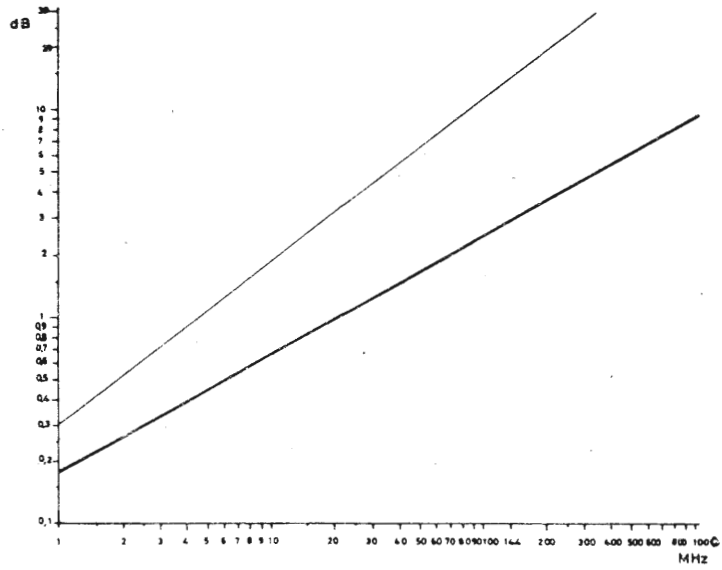


Fig. 10.- Impedenza dei cavi coassiali. Grafico delle attenuazioni in funzione della frequenza (linea spessa) per ogni 30 metri, dei cavi coassiali RG-8, 8A, 9, 9A, 11, 11A, 13, 13A, 213, 214, 215 e 216. La linea sottile corrisponde al tipo RG- 58/U.

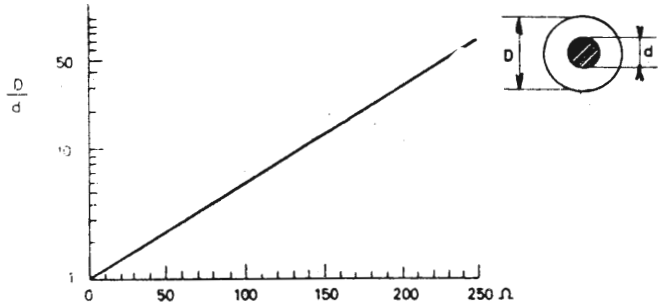


Fig. 11.- Impedenza di una linea coassiale con isolamento in aria, in funzione del rapporto tra i diametri.

Impedenza dei cavi coassiali

I cavi coassiali sono stati standardizzati in due grandi gruppi, in funzio-

CAVI CELLFLEX					
TIPO	IMPEDENZA	VELOCITA' DI PROPAG.	CAPACITA'	POTENZA A 100 MHz	ATTEN. dB/100 m A 100MHz
CF 1/4"	50 Ω	82 %	82 pF/m	1,46 kW	4,5
CF 3/8"	50 Ω	82 %	82 pF/m	2 kW	3,5
CF 1/2"	50 Ω	82 %	82 pF/m	3,4 kW	2,4
CF 1/8"	50 Ω	82 %	81 pF/m	6,8 kW	1,36
CF 15/8"	50 Ω	80 %	81 pF/m	14,3 kW	0,84

CAVO CELLFLEX ULTRA FLESSIBILE					
TIPO	IMPEDENZA	VELOCITA' DI PROPAG.	CAPACITA'	POTENZA A 100 MHz	ATTEN. dB/100 m A 100MHz
HCF 1/2"	50 Ω	75 %	85 pF/m	2,3 kW	3,7

Tabella 2.- Caratteristiche dei cavi coassiali più attuali.

CAVI COMFLEX					
TIPO	IMPEDENZA	VELOCITA' DI PROPAG.	CAPACITA'	POTENZA A 100 MHz	ATTEN. dB/100 m A 100MHz
CX 2/6	50 Ω	69 %	97 pF/m	1,35	5,3
CX 4/12	50 Ω	69 %	97 pF/m	3,2	2,9

CAVI FLEXWELL					
TIPO	IMPEDENZA	VELOCITA' DI PROPAG.	CAPACITA'	POTENZA A 100 MHz	ATTEN. dB/100 m A 100MHz
HF 3/8"	50 Ω	69 %	77 pF/m	2,6 kW	2,8
HF 5/8"	50 Ω	92 %	72 pF/m	5 kW	1,75
HF 7/8"	50 Ω	93 %	71 pF/m	9,1 kW	1,18
HF 1 1/8"	50 Ω	92 %	73 pF/m	12,9 kW	0,91
HF 1 5/8"	50 Ω	95 %	70 pF/m	21 kW	0,64
HF 3"	50 Ω	96 %	70 pF/m	38 kW	0,45
HF 3 1/8"	50 Ω	96 %	70 pF/m	59 kW	0,36
HF 4 1/8"	50 Ω	97 %	68 pF/m	90 kW	0,28
HF 5"	50 Ω	96 %	70 pF/m	141 kW	0,22
HF 6 1/8"	50 Ω	97 %	69 pF/m	187 kW	0,189
HF 8"	50 Ω	97 %	69 pF/m	310 kW	0,146
HF 8"-S	50 Ω	98 %	68 pF/m	445 kW	0,157
HF 9"-SAI	50 Ω	98 %	68 pF/m	610 kW	0,157
HF 12"-S	50 Ω	98 %	68 pF/m	881 kW	0,112

CAVI RADIALFLEX					
TIPO	IMPEDENZA	VELOCITA' DI PROPAG.	CAPACITA'	ATTEN. dB/100 m A 100MHz	PERDITA DI ACCOPP.
AHF 7/17	50 Ω	79 %	85 pF/m	26	70 dB
AHX 6/17	50 Ω	66 %	101 pF/m	28	70 dB
AHX 4/11	50 Ω	66 %	101 pF/m	41	67 dB

ne della loro impedenza caratteristica: 50 Ω e 70 Ω.

Normalmente si fabbricano a 52 e 75 Ω, anche se in Europa si sta sviluppando il cavo coassiale a bassa perdita con impedenza di 60 Ω.

L'equazione che permette di calcolare l'impedenza di una linea coassiale con isolamento in aria è:

$$Zo = (138 \times \log D/d) \; ; \qquad Zo = \text{impedenza in ohm}$$

dove D è il diametro del conduttore esterno, e d il diametro di quello interno.

Nel caso si impiegasse un altro dielettrico non aereiforme l'equazione diventa:

$$Zo = (138 \times \log D/d) \times \frac{1}{\sqrt{K}}$$

dove K = costante dielettrica del materiale.

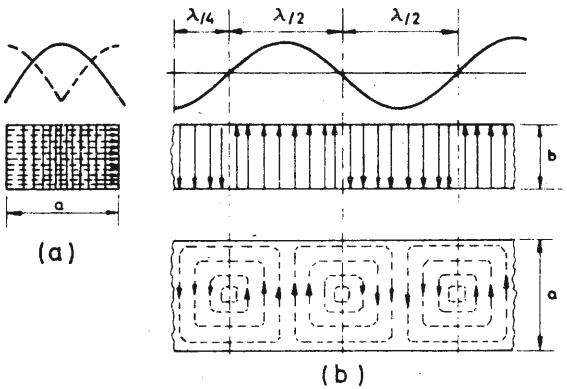


Fig. 12.- Guida d'onda: a) sezione trasversale; b) distribuzione del campo magnetico lungo una guida d'onda rettangolare. Le linee tratteggiate rappresentano il campo magnetico, mentre quelle continue il campo elettrico.

TIPO	*E20*	*E26*	*E30*	*E38*	*E48*	*E54*	*E62*
FREQUENZA GHz	1,7-2,4	2,3-2,9	2,35-3,1	3,4-4,2	4,2-5	5-6	5,4-6,5
FATTORE DI RIFLESSIONE	0,03	0,035	0,025	0,02	0,025	0,015	0,015
ATTENUAZIONE dB/100	1,05-1,5	1,35-1,8	1,4-2	2,1-2,55	4-5,6	3,9-5	4,2-5,4
DIMENSIONI mm	144×81	112×69	111×65	84×61	58×45	54×36	49×33

TIPO	*E65*	*E68*	*E70*	*E80*	*E100*	*E110*	*E130*	*E150*
FREQUENZA GHz	5,9-7,15	6,4-7,15	6,4-7,75	7,1-7,8 7,7-8,5	8,5-10	9,5-11,7	10-13,25	14,4-15,35
FATTORE DI RIFLESSIONE	0,015	0,015	0,02	0,025	0,015	0,02	0,02	
ATTENUAZIONE dB/100	4,3-4,9	4,7-6	4,6-5,4	6,4-7,8	8,4-10,2	10,3-12,5	11,2-13,9	15
DIMENSIONI mm	53×33	47×31	48×28	40×27	34×23	31×21	19×18	24×17

Tabella 3.- Caratteristiche delle guide d'onda Flexwell.

Fattore di velocità

Il *fattore di velocità* nel caso di linee coassiali con dielettrico gassoso vale approssimativamente 1; nei cavi a dielettrico solido, oscilla tra 0,65 e 0,80.

Normalmente i costruttori lo specificano per ciascun tipo di cavo, il che permette di esprimere una linea che ha una lunghezza fisica determinata, in lunghezze d'onda.

L'equazione che permette di calcolare la lunghezza elettrica nello spazio libero con fattore di velocità pari a 1 è:

$$\frac{300}{f} = L \text{ (in metri);}$$

dove f = frequenza (in MHz).

Se si moltiplica questo risultato per il fattore di velocità del cavo che si utilizza, si otterrà la lunghezza fisica del cavo, corrispondente a quella lunghezza d'onda.

Guide d'onda

Quando la frequenza dell'onda elettromagnetica che circola in una linea di trasmissione aumenta, le perdite divengono maggiori. Lavorando con le microonde, le perdite occasionali delle linee convenzionali le rendono inutilizzabili, per cui vengono utilizzati dei tubi, dimensionati trasversalmente in funzione della lunghezza d'onda che si vuole trasmettere.

Generalmente la sezione di questi tubi, chiamati *guide d'onda*, ha forma rettangolare; nel loro interno l'onda si propaga sotto forma di campo elettrico e magnetico (definiti modi).

Il *modo elettrico trasversale* si ha quando l'energia del campo elettrico è trasversale rispetto all'asse della guida d'onda, e il campo magnetico è coassiale; viene normalmente indicato con l'abbreviazione TE.

Il *modo trasversale magnetico* TM, si ha quando il campo magnetico è trasversale all'asse della guida d'onda, e quello elettrico coassiale.

Per progettare le caratteristiche della guida d'onda, si utilizzano le lettere TE o TM come visto in precedenza, e due subindici numerici. Il primo di questi indica il numero delle caratteristiche trasversali di semionda che sono presenti lungo una sezione trasversale, nella sua dimensione più corta, il secondo indica il numero di caratteristiche trasversali lungo la dimensione mag-

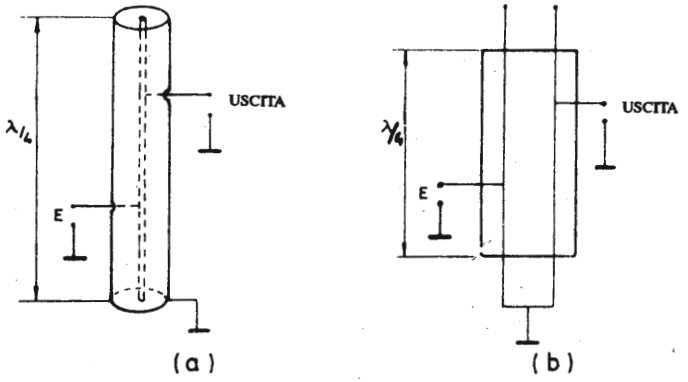


Fig. 13.- Circuiti risonanti: a) coassiale; b) a linea piana.

giore.

La guida d'onda presenta una frequenza di taglio tale, che le frequenze più basse a questa non si propagano. Viene indicata con λ_c, e il modo dominante corrisponde al doppio della larghezza della guida, $\lambda_c = 2a$.

La lunghezza dell'onda nella guida, nel verso assiale, corrisponde alla variazione di un ciclo nella configurazione del campo. Il suo valore è:

$$\lambda_c = \frac{1}{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}$$

dove λ è la lunghezza d'onda, e λ_c è la lunghezza della frequenza di taglio.

L'impedenza di una guida d'onda per il modo TE viene determinata da:

$$Z = 377 \frac{\lambda_g}{\lambda} \quad \text{e per il modo TM, } Z = \frac{\lambda}{\lambda_g}$$

dove λ_g è la lunghezza dell'onda nella guida.

Come nelle altre linee di trasmissione, le guide d'onda portano delle attenuazioni, ma non avendo dielettrico allo stato solido sono molto piccole, e non hanno nessuna classe di irradiazione.

L'energia viene trasferita verso l'esterno o verso l'interno della guida d'onda tramite delle scanalature praticate sulle sue pareti. Si può anche realizzare tramite un avvolgimento che tagli le linee magnetiche, o con una antenna o sonda posta parallelamente alle linee elettriche.

Nel caso si utilizzi la scanalatura, l'accoppiamento è elettrico quando queste linee passano nello spazio esterno, e la grandezza, la forma, e la dimensione della scanalatura caratterizzano la natura e il grado dell'accoppiamento.

Altre applicazioni delle linee di trasmissione

Sino ad ora sono state descritte le applicazioni per il trasporto dell'energia elettromagnetica da un punto ad un altro. Tuttavia, ci sono altre applicazioni. Si possono, ad esempio, utilizzare linee risonanti a bassa perdita nello spettro del VHF e UHF, come circuiti risonanti in serie o in parallelo con un alto valore del fattore Q, in tutti quei casi in cui i circuiti normali, basati sulle bobine e sui condensatori, risultano inefficaci.

La lunghezza di questi circuiti risonanti è normalmente di una mezza lunghezza d'onda o di un quarto di lunghezza d'onda, e il fattore Q di valore maggiore si ottiene con quelle a un quarto di lunghezza d'onda. Verranno descritte, nei paragrafi che seguono, alcune applicazioni concrete basate su quanto ora esposto.

Filtri elettrici

E' possibile utilizzare sezioni a un quarto d'onda o a mezza onda per l'eliminazione delle irradiazioni o delle ricezioni spurie, utilizzandoli come *filtri*, sia di tipo passa-basso, sia di tipo passa-alto o passa-banda, in sostituzione dei filtri a elementi discreti.

Reattanze a bassa perdita

Si possono utilizzare parti di linea come *reattanze a bassa perdita*, per eliminare o sopprimere componenti reattive e ottenere un buon adattamento della linea con l'antenna o il ricevitore. Quando in una linea sono presenti delle onde stazionarie, su questa vi sono alcuni punti (nodi di tensione o di corrente) in cui la componente resistiva è uguale all'impedenza.

Se in uno di questi punti si pone in parallelo una reattanza uguale e di verso opposto alla reattanza già presente in quel punto, la linea verrà pulita

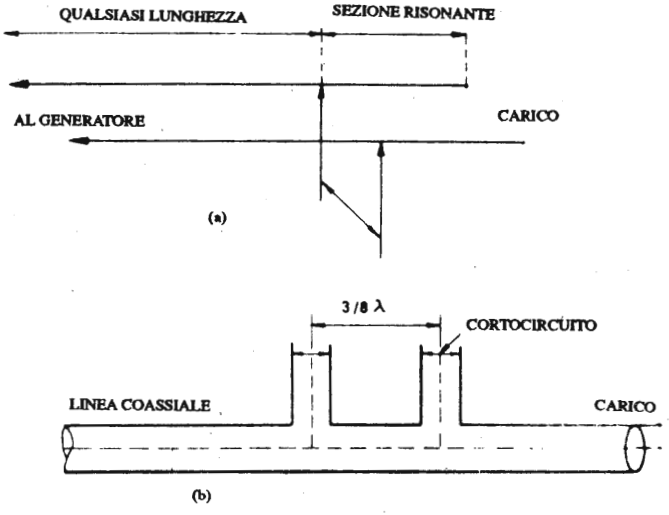


Fig. 14.- Adattamento della linea di trasmissione utilizzando le reattanze: a) in una linea aperta; b) in una linea coassiale.

dalle onde stazionarie da questo punto all'alimentazione.

Questa reattanza, può essere realizzata con un pezzo di linea uguale a quella di trasmissione, ossia, della stessa impedenza.

Per posizionare questo pezzo di linea, si ricerca il punto più vicino all'antenna o al carico, poiché è necessario in pratica, ritoccare quello che si è ricavato con il calcolo matematico.

Per ottenere un buon adattamento, nel caso di linee bifilari aperte, il problema si riduce alla prova nei pressi del punto con un pezzo di linea o sezione che ha una lunghezza regolabile.

Per le linee coassiali, questo procedimento è più laborioso, poiché si può variare il pezzo di linea in cortocircuito ma non il punto di connessione; allora si prendono due pezzi di linea di lunghezza variabile (un quarto d'onda se si pone in cortocircuito, e mezza onda se si lasciano le linee aperte), e si collocano separati di circa 3/4 di lunghezza d'onda dalla linea principale, in modo tale che si possano regolare per eliminare la reattanza, allo stesso modo in cui si agiva con una sola sezione di linea aperta.

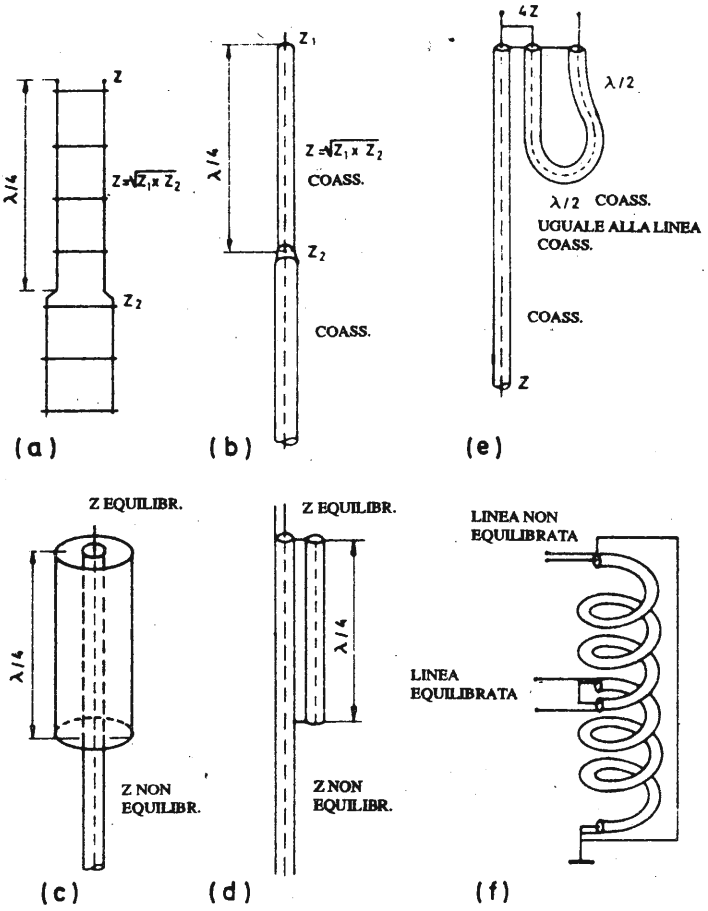


Fig. 15.- Sezioni adattatrici di impedenza: a) per linea bifilare; b) per linea coassiale; c) e d) passaggio da una linea squilibrata a una linea equilibrata (conservando l'impedenza); e) passaggio da una linea equilibrata a una linea squilibrata, con un rapporto di impedenza di 1:4; f) trasformatore di banda larga da 6 a 30 MHz.

Sezioni adattatrici d'impedenza

Una sezione di linea della lunghezza di un quarto d'onda o multipli di-

spari di questa, ha la proprietà di poter essere utilizzata come *trasformatore d'impedenza*, poiché alla frequenza per la quale è stata tagliata si soddisfa la seguente condizione:

$$Zo = \sqrt{Ze \times Zs}$$

dove Zo è l'impedenza della linea a un quarto di onda, Ze è l'impedenza di ingresso, e Zs è l'impedenza di uscita, ossia, in una linea a un quarto di onda, la media geometrica delle impedenze degli estremi è uguale all'impedenza caratteristica di questa.

E' anche possibile passare da una linea squilibrata, coassiale, a un carico equilibrato, utilizzando un manicotto a un quarto di onda posto all'estremità della linea. Questo manicotto agisce come conduttore esterno del cavo coassiale nell'ultimo quarto di onda, e la calza resta in aria in modo tale che l'impedenza non subisce variazioni.

Allo stesso modo possiamo passare da una linea asimmetrica o squilibrata, ad un'altra equilibrata con un rapporto di impedenze da uno a quattro, per mezzo di una linea di lunghezza pari a mezza onda. Con questo metodo si sfrutta la proprietà di inversione di fase che hanno le linee a semionda, il cui funzionamento è basato sul fatto che in una linea equilibrata si ha la stessa tensione tra ogni conduttore e terra e tra il conduttore centrale e terra, ottenendo così un rapporto di tensione pari a 2, o una variazione di impedenza di 4.

Per il calcolo delle linee a un quarto di onda o a mezza onda, bisogna tener presente la frequenza con cui si lavora, poiché sono dispositivi a banda stretta che agiscono solamente in un margine molto vicino alla frequenza per la quale sono stati progettati, così come bisogna considerare il fattore di velocità delle linee utilizzate.

Esiste un adattatore, basato su linee coassiali, che non risente questi problemi, poiché permette di passare da una linea squilibrata ai terminali equilibrati, mantenendo la propria impedenza.

Si tratta di una bobina a 9 spire realizzate con un filo lungo 4,90 metri di cavo coassiale RG 8/U, per un'impedenza di 52 Ω, e di RG 11/U per un'impedenza di 75 Ω, con un diametro di 17,1 centimetri. Ad un estremo si uniscono i conduttori esterno e interno, e si collegano al punto comune di terra; al centro si eliminano un paio di centimetri di calza. I conduttori centrali e la calza del pezzo di coassiale il cui estremo è stato cortocircuitato si uniscono tra di loro per ottenere un punto di uscita equilibrata; l'altro punto sarà la calza del coassiale non cortocircuitata, al cui estremo verrà connessa la linea (il conduttore centrale con quello centrale, la calza con la calza, e la massa). Questo adattatore funzionerà in un ampio margine di frequenze, coprendo le bande HF dei radioamatori.

CONTIENE LA GUIDA A:
SIMBOLI, UNITÀ DI MISURA,
TABELLE DI CONVERSIONE
E CODICI COLORE
DEI COMPONENTI ELETTRONICI

La scoperta delle onde elettromagnetiche ha reso possibile la trasmissione e la ricezione dei segnali in radiofrequenza tra punti geograficamente molto distanti, scoperta che ha permesso una vera e propria rivoluzione nel mondo dell'audio.
Per il profano l'antenna può apparire un elemento insignificante, ma la realtà è ben diversa. In nessun modo sarebbe stato possibile un collegamento hertziano se non si fosse utilizzata l'antenna come emittente e captante dei segnali radio.
Però, che cos'è una antenna? Come funziona? Perché a volte ha forme così strane? Tutte queste domande hanno la loro risposta chiara e precisa in questo libro, nel quale si richiamano gli aspetti teorico-pratici più importanti riguardanti le antenne emittenti e riceventi, così come quelli inerenti alle linee di trasmissione incaricate di trasportare l'energia in radiofrequenza tra il trasmettitore e l'antenna, tra l'antenna e il ricevitore, o tra le due apparecchiature.

GRUPPO EDITORIALE JACKSON

ISBN 88-256-0065-8

9 788825 600650

L. 12.500 Cod. 069E